

O EFEITO DA PRESENÇA DE FINOS NA FLOTAÇÃO DO FOSFATO DE ITATAIA, BRASIL

JOSÉ ORLANDO C. DANTAS ¹
RUPEN ADAMIAN ²

RESUMO

A pesquisa desenvolvida com o minério fósforo-uranífero de Itataia teve como objetivo o estudo de dois aspectos da maior importância na flotação desse minério: o efeito do tamanho de partícula e os problemas causados pela presença significativa de calcita na ganga, que comprometem a seletividade do processo. A fase experimental constou de caracterização mineralógica, ensaios de moagem e, principalmente, ensaios de flotação em batelada, sem deslamagem, apenas com uma etapa de desbasta. O sistema de reagentes utilizado foi aquele comumente empregado em escala industrial: "tall oil" como coletor da colofana; silicato de sódio como depressor dos silicatos e dispersante da polpa; amido como depressor dos carbonatos e pH alcalino para a flotação. A partir do modelo proposto por Klimpel foram calculados os parâmetros cinéticos: recuperação máxima extrapolação (R) e constante cinética (K). Os melhores resultados mostram que, a partir de alimentação contendo 12,0% de P_2O_5 , obteve-se um concentrado com teor de 17,4% de P_2O_5 e recuperação de 94,0%. Analisando o comportamento das partículas em relação ao tamanho, verificou-se que a recuperação das partículas maiores que 37 μm (400 malhas) foi elevada (98,9%), enquanto que a das partículas menores situou-se em 82,2%.

¹ Engenheiro de Minas. M.Sc. - Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

² Engenheiro de Minas e Metalurgista, D.Sc. - Professor Titular, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo o estudo de dois fatores inter relacionados, cujo mecanismo de atuação ainda não tem sido convenientemente esclarecido: a dificuldade na flotação do sistema apatita/calcita e o comportamento das partículas finas na flotação. Em linhas gerais, as empresas que processam minério fosfático adotam o seguinte procedimento: flotação direta da rocha fosfática com coletor aniônico, em meio alcalino, antecedida de deslamagem^(1,2). No entanto, como as perdas em P_2O_5 contido nas lamas são significativas, já se observa um esforço na recuperação dos finos^(7,8).

Entre as diversas pesquisas em que é abordada a flotação de fosfatos, verifica-se que, nos casos onde ocorre apatita associada à ganga carbonática, a presença do cátion comum (Ca^{++}) reduz a seletividade na flotação^(3,4,10,11). Por outro lado, foi constatado que a granulometria das partículas minerais exerce forte influência no processo de flotação, ficando evidente que as partículas mais grosseiras apresentam maior flotação que as mais finas, dentro de certos limites^(5,6,9,10,12,13,14). De acordo com Glembotskii⁽⁹⁾, a presença de partículas muito finas na polpa ocasiona importantes efeitos na flotação, tais como o aumento no consumo de reagentes, a contaminação de concentrado com frações de ganga ("slime coating") e a redução na velocidade de flotação, possivelmente devido à baixa cinética de adesão entre as partículas e as bolhas. Após continuadas pesquisas^(5,10,12,15,16,17,18), visando ao aspecto cinético, como uma ferramenta para otimizar o processo, Klimpel⁽¹⁹⁾ desenvolveu o seguinte modelo matemático:

$$r = R \left\{ 1 - \left(\frac{1}{Kt} \right) [1 - \exp(-Kt)] \right\}$$

Através desta equação onde "r" representa a recuperação em um dado tempo "t", são obtidos os dois parâmetros cinéticos: recuperação máxima extrapolada (R) e constante cinética (K). Fisicamente, estes valores possibilitam, a partir dos resultados em escala de bancada, um melhor controle da usina industrial, através do ajuste

de parâmetros físicos e químicos envolvidos no processo.

2. CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Inicialmente foram retiradas amostras do minério fósforo-uranífero de Itataia, representativas da pilha de cerca de 2 toneladas, para estudos petrográficos. Em seguida, após cominuição do minério, utilizou-se os seguintes métodos de análise, visando a completa caracterização do minério (na alimentação), bem como de concentrados e rejeitos na flotação: análise granulométrica (Tabela 1), difração de Raios X, espectrografia de emissão ótica, análise química (por via úmida e por fluorescência de Raios X) e análise mineralógica semiquantitativa de minério (Tabela 2).

FAIXA GRANULOMÉTRICA (Malhas Tyler)	RETIDA (%)	RETIDA ACUMULADA (%)	PASSANTE ACUMULADA (%)	TEOR P_2O_5 (%)	DISTR. P_2O_5 (%)
+14	25,8	25,8	74,2	12,3	27,8
14/20	17,8	43,6	56,4	11,9	18,6
20/28	11,4	55,0	45,0	11,1	11,0
28/35	9,8	64,8	35,2	10,9	9,4
35/48	5,1	69,9	30,1	10,4	4,6
48/65	4,3	74,2	25,8	10,4	3,9
65/100	5,9	80,1	19,9	10,7	5,5
100/150	3,7	83,8	16,2	11,0	3,6
150/200	3,2	87,0	13,0	11,4	3,2
200/270	1,9	88,9	11,1	11,8	1,9
270/325	1,0	91,0	10,1	12,0	1,1
325/400	1,1	100,0	9,0	12,3	1,1
-400	9,0	-	0	10,5	8,2
TOTAL	100,0	-	-	11,4	100,0

Tabela 1 - Análise granulométrica e distribuição de P_2O_5 no minério após britagem abaixo de 10 malhas.

MINERAL	%
Colofanita	28,0
Calcita	24,0
Feldspato	21,0
Micas (Biotita e Muscovita)	8,5
Quartzo	7,0
Outros*	11,5

* Outros: Representados principalmente por anfibólio e piroxênio, acrescidos de epidoto e óxidos de ferro.

Tabela 2 - Análise mineralógica semiquantitativa do minério fosfático de Itataia.

O método utilizado para determinação do grau de liberação da colofanita foi uma adaptação simplificada do método de Gaudin, através de observações em lupa binocular e em microscópio petrográfico, para cada faixa granulométrica. Os resultados estão apresentados na Tabela 3, a seguir:

FAIXA GRANULOMÉTRICA (MALHAS)	LIBERAÇÃO (%)
48/65	75
65/100	80
100/150	90
150/200	95

Tabela 3 - Determinação do grau de liberação da colofanita.

3. METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE BENEFICIAMENTO

A partir da pilha contendo cerca de 500kg, todo o minério foi cominuído abaixo de 0,5 polegada em britador de mandíbulas (primário e secundário), e posteriormente em britador de rolos, a menos de 10 malhas na série Tyler. Em seguida, foi feita pilha de homogeneização, de onde foram retiradas e ensacadas amostras pesando 1kg, destinadas aos ensaios de moagem e flotação.

Os estudos de liberação do minério (Tabela 3) indicaram a necessidade de se cominuir o minério a uma granulometria 80% passante em 65 malhas, para a alimentação da flotação. Com este objetivo, foram executados ensaios de moagem, em moinho de barras (30cm x 15,5cm), com barras de 2,5cm de diâmetro. Através de várias moagens, alterando apenas os tempos de cominuição, foi calculado, graficamente, o tempo de 12 minutos, para atingir a granulometria ideal para alimentar a flotação.

Toda a parte experimental foi desenvolvida por meio de testes de flotação em batelada, sem deslamagem e com apenas um estágio de desbaste. Os ensaios foram realizados em célula de laboratório DENVER D-12, utilizando-se cuba de 5 litros. A percentagem de sólidos na flotação foi de 19% e o sistema de reagentes utilizado consistiu no "tall oil" como coletor (e espumante), além do silicato de sódio e amido. Como em toda a pesquisa levou-se em consideração o estudo da cinética de flotação, em cada ensaio foram coletadas 5 alíquotas de concentrado em diferentes tempos, além do rejeito; após o cálculo do balanço metalúrgico, os valores da recuperação constituíram os dados de entrada para o programa de computador, idealizado por Klimpel¹⁹, na determinação dos parâmetros cinéticos R (recuperação máxima extrapolada) e K (constante cinética).

Nos ensaios onde foi estudado o efeito do tamanho de partícula sob o aspecto cinético, após seguir o procedimento já comentado, cada produto da flotação (5 alíquotas de concentrado, além do rejeito) foi peneirado em 400 malhas. Em seguida, efetuou-se os seguintes balanços metalúrgicos, em separado: das partículas finas e grosseiras e, depois, o de todas as partículas, através de composição ponderada.

4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

a) Efeito do coletor na cinética de flotação

Em se tratando de flotação aniônica de minério fosfatado, sem prévia deslamagem, foi testado o coletor mais comumente utilizado, o "tall oil" (saponificado com NaOH), que é um composto orgânico constituído principalmente pelos ácidos oléico e linoléico. Além do "tall oil", cujos valores das concentrações em pregadas referem-se à prática industrial corrente (750; 1000; 1250 e 1500g/t), foram utilizados os seguintes reagentes:

- dispersante da polpa e depressor dos silicatos: Na_2SiO_3 (200g/t);
- depressor dos carbonatos: amido (600g/t) e
- regulador do pH: NaOH (em quantidade variável, até atingir pH=10)

Os resultados obtidos, representados graficamente na Figura 1, evidenciam um aumento inicial da recuperação máxima extrapolada (R) com a concentração do coletor, apresentando, a partir de 1000g/t, uma tendência de estabilidade. Por outro lado, constata-se pequenas variações da constante cinética (K) em torno do valor $K=4$; no entanto, ocorre um aumento significativo ($K=6,3$) para 1500g/t de coletor.

Observa-se que, a partir de um valor próximo de 1000g/t de coletor, tem-se uma região em que a constante cinética (K) assume valores sempre superiores a 3,5 e, simultaneamente, a recuperação máxima extrapolada (R) é superior a 0,90. Da observação da Figura 1, verifica-se que os melhores resultados obtidos para o binômio R-K referem-se à concentração de 1000g/t do coletor. Abaixo desse valor, os resultados obtidos indicam que, ao nível de 750g/t, a concentração de "tall oil" é insuficiente. Quanto ao comportamento da recuperação máxima extrapolada (R), os resultados confirmam a opinião de Castro¹, em que se teria a representação do fenômeno de adsorção química entre o coletor e a superfície do mineral. O aumento no valor de R acompanha a elevação da concentração do coletor até um dado nível, neste caso, 1000g/t, mantendo-se constante a partir daí. O sensível aumento do valor de K, para 1500g/t de coletor, provavelmente é devido ao aumento da flotabilidade das partículas grosseiras.

b) Efeito do tamanho da partícula na cinética de flotação

De acordo com os comentários da introdução, diversos autores enfatizam a influência do tamanho da partícula mineral na flotação. Dois aspectos são considerados: a) no que diz respeito à cinética, as partículas grosseiras flutam mais rapidamente que as mais finas; b) quanto à recuperação em função do tamanho da partícula, existe uma faixa ideal, de granulometria intermediária (geralmente entre 10 e 150 μ m), onde a flotabilidade é máxima. Numa série de ensaios, variando a concentração do amido entre 300 e 600g/t e utilizando os demais reagentes do sistema convencional: Na_2SiO_3 (200g/t); "tall oil" (1000g/t) e NaOH (até pH=10), procedeu-se ao peneiramento dos produtos obtidos, em peneira de 400 malhas. As alíquotas de concentrado obtidas com a variação do tempo de flotação ($t_1=0$ a 30 segundos; $t_2=30$ a 60 segundos; $t_3=60$ a 120 segundos; $t_4=120$ a 180 segundos; $t_5=180$ a 240 segundos), foram subdivididas em +400 malhas e -400 malhas, o mesmo acontecendo com o rejeito.

Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas 4 e 5 e representados nas Figuras 2 e 3. Os valores de R e K são sensivelmente superiores para as partículas mais grosseiras (acima de 400 malhas), ratificando os dados da literatura^{10,16}. Observa-se pela Figura 3 um incremento no valor da constante cinética, acompanhando o aumento na concentração do amido entre 300 e 500 g/t e com tendência à estabilização até nível de 600g/t. A Tabela 4, apresentando o balanço metalúrgico do teste-padrão, que corresponde ao ponto de concentração do amido igual a 600g/t e representado na Figura 4, mostra alguns aspectos relevantes, tanto no comportamento cinético, como no que se referir ao tamanho das partículas, neste caso, acima e abaixo de 400 malhas (37 μ m). Quanto à velocidade de flotação do minério fosfático de Itataia, observa-se na Tabela 4 que ela é relativamente elevada: após 60 segundos, foram flutados 88,2% do P_2O_5 existente na fração maior que 400 malhas, juntamente com 57,6% do P_2O_5 contido na granulometria inferior a 400 malhas, totalizando 79,7% do P_2O_5 existente em todas as faixas granulométricas. A partir de 120 segundos até o final do tempo de flotação, 240 segundos, o aumento na distribuição de P_2O_5 é mínima na faixa de granulometria maior do que 400 malhas, e um pouco maior na faixa de granulometria mais fina, concordando com os resu-

a) Fração +400 Malhas

PRODUTOS	TEMPO (s)	MASSA (g)	MASSA (%)	P ₂ O ₅ (%)	DIST. * (%)
Conc. 1	30	201,5	28,7	20,5	49,5
Conc. 2	60	176,5	25,2	18,3	88,2
Conc. 3	120	79,4	11,3	10,5	98,2
Conc. 4	180	19,0	2,7	2,3	98,7
Conc. 5	240	8,4	1,2	1,8	98,9
Conc. Global	-	484,8	69,1	17,0	98,9
Rejeito	-	216,3	30,9	0,5	1,1
Alimentação	-	701,1	100,0	11,9	100,0

b) Fração -400 Malhas

PRODUTOS	TEMPO (s)	MASSA (g)	MASSA (%)	P ₂ O ₅ (%)	DIST. * (%)
Conc. 1	30	46,2	18,3	20,9	31,8
Conc. 2	60	40,9	16,2	19,3	57,6
Conc. 3	120	28,8	11,4	18,2	74,6
Conc. 4	180	11,6	4,6	14,1	79,9
Conc. 5	240	7,5	3,0	9,2	82,2
Conc. Global	-	135,0	53,5	18,6	82,2
Rejeito	-	117,4	46,5	4,7	17,8
Alimentação	-	252,4	100,0	12,1	100,0

c) Todas as Faixas Granulométricas

PRODUTOS	TEMPO (s)	MASSA (g)	MASSA (%)	P ₂ O ₅ (%)	DIST. * (%)
Conc. 1	30	247,7	26,0	26,0	44,6
Conc. 2	60	217,4	22,8	18,5	79,7
Conc. 3	120	108,2	11,4	12,5	91,5
Conc. 4	180	30,6	3,2	6,6	93,3
Conc. 5	240	15,9	1,7	5,7	94,0
Conc. Global	-	619,8	65,1	17,4	94,0
Rejeito	-	333,7	34,9	2,0	6,0
Alimentação	-	953,5	100,0	12,0	100,0

Tabela 4 - Balanço metalúrgico do teste-padrão.

* Distribuição acumulada em P₂O₅ (%)

dos encontrados na literatura, que indicam flotação mais lenta para as partículas mais finas^(3,12,15).

AMIDO (g/t)	FAIXA GRANULOMÉTRICA	R	K
300	+ 400 malhas	0,9789	3,3695
	- 400 malhas	0,8680	1,7790
	Global	0,9607	2,8654
400	+ 400 malhas	0,9715	4,6354
	- 400 malhas	0,7984	2,2532
	Global	0,9291	3,8119
500	+ 400 malhas	0,9880	4,8377
	- 400 malhas	0,7973	2,9845
	Global	0,9310	4,3695
600	+ 400 malhas	0,9919	4,8195
	- 400 malhas	0,8502	2,7961
	Global	0,9502	4,2048

Tabela 5 - Valores de R e K em função do consumo de amido (g/t), por faixa granulométrica.

Constata-se também uma acentuada queda no teor em P_2O_5 , principalmente nas partículas mais grosseiras, sendo este de crescimo mais evidenciado a partir de 120 segundos.

Finalmente, vê-se que 98,8% do P_2O_5 existente em partículas acima de 400 malhas foram flotados, com um descarte significativo de massa, da ordem de 30,9%, com teor inexpressivo de apenas 0,5% de P_2O_5 . Como era de se esperar, o mesmo desempenho não foi apresentado pela fração mais fina, onde foram recuperados 82,2% do P_2O_5 contido nesta granulometria, deixando de ser flotado 17,8% do fosfato da faixa inferior a 400 malhas, com teor médio de 4,7% de P_2O_5 .

Os resultados mostraram que para o minério fosfático em estudo, o percentual de recuperação nas partículas mais grosseiras foi excelente (98,9%), ainda que considerando-se a flotação global, sem deslamagem e com apenas um estágio de desbaste. Quanto às partículas mais finas, a recuperação atingiu 82,2%, in fluindo na recuperação global de 94,0%; sugere-se estudar posteriormente a possibilidade de recuperar apenas a fração mais fina con tida no rejeito da flotação global.

5. CONCLUSÕES

O depósito fósforo-uranífero de Itataia tem como mineral útil a colofana, que é uma variedade de apatita, apresen tando característica de mineral amorfo; a ganga é constituída pre dominantemente por calcita e feldspato. O caráter friável do miné rio desaconselha moagem excessiva, evitando maior geração de fi nos. Constatou-se que, após 12 minutos de moagem, a porcentagem de partículas menores que 400 malhas aumentou de 9 para 30%.

No estudo do efeito do coletor na cinética de flo tação, utilizando-se o "tall oil", foi verificado um aumento inci al da recuperação máxima extrapolada (R) com a concentração do co letor, apresentando a partir de 1000g/t uma tendência de estabilí dade. No entanto, constante cinética (K) apresenta, para menores concentrações do coletor, pequenas variações em torno do valor K=4, alcançando, porém, um valor significativo (K=6,3) para 1500g/t do coletor.

Quanto ao efeito do tamanho da partícula na flota bilidade, para as diversas concentrações de amido, foi confirmado em todos os casos que os valores de R e K são maiores para a fra ção mais grosseira do que em relação à fina (menor que 37 μ m). Ain da no estudo do amido foi verificado que a recuperação na flotação é elevada até o primeiro minuto, aumentando mais lentamente até o final da flotação. Este aspecto é mais acentuado entre as partícu las mais grosseiras, já que as finas flotam mais lentamente.

No teste-padrão de flotação, a partir de alimenta ção com 12,0% de P_2O_5 , obteve-se recuperação de 94,0% e teor de

17,4% de P_2O_5 no concentrado. Analisando o comportamento do tamanho da partícula na flotação, verificou-se que a recuperação das partículas maiores que $37\mu m$ (400 malhas) foi de 98,9%, enquanto que a das menores foi de 82,2%. A menor recuperação das partículas mais finas, influenciando no decréscimo da recuperação global, torna válidos estudos posteriores apenas com a fração menor que $37\mu m$, contida nos rejeitos da flotação de desbaste, visando aumentar a recuperação global.

BIBLIOGRAFIA

1. BETZ, E.W. Beneficiation of Brazilian phosphates. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 13, Varsóvia, 1979. Preprint. v.2, p. 475-504.
2. STOWASSER, W.F. Phosphate rock. Washington Bureau of Mines. 16 p. Mineral Facts and Problems, 1985 edition. Preprint from Bulletin, 675.
3. CASTRO, S. Fundamentos físico-químicos de la flotación: apuntes del curso de postgrado. Rio de Janeiro, CETEM, 1982. 507 p.
4. MINING chemicals handbook. New Jersey, American Cyanamid Company, 1976. 111 p.
5. AWASTHI, P.K. & LUTHRA, K.L. Beneficiation and utilization of low grade Mussorie Rock Phosphate. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 12, São Paulo, 1977. p. 25-48.
6. TOWN, J.W. Batch and continuous-circuit beneficiation of western phosphate ores. Report of Investigations. Bureau of Mines, Washington, n. 6930, 1967, 41 p. (RI 6930).
7. FURTADO, J.R.V. & PERES, A.E.C. Flotação em coluna aplicada aos finos de minério fósforo-uranífero de Itataia-CE. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 11, Natal, 1985. Anais, p. 13-28.

8. AQUINO, J.A. & FURTADO, J.R.V. Flotação reversa aplicada ao minério fósforo-uranífero de Itataia-CE. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 11, Natal, 1985. Anais, p. 29-48.
9. GLEMBOTSKII, V.A.; KLASSEN, V.I.; PLAKSIN, I.N. Flotation. New York, Primary Sources, 1972. 66 p.
10. KELLY, E.G. & SPOTTISWOOD, D.J. Introduction to mineral processing. New York, John Wiley. p. 21-43; 301-319.
11. HANNA, H.S. & SOMASUNDARAN, P. Flotation salt-type minerals. In: FUERSTENAU, M.C. Flotation; A.M. Gaudin memorial volume. New York, AIME, 1976. cap. 8, p. 197-272.
12. TRANHAR, W.J. A rational interpretation of the role of particle size in flotation. Int. J. Min. Process., (8): 289-327, 1981.
13. TRANHAR, W.J. & WARREN, L.J. The flotability of very fine particles; a review. Int. J. Min. Process., (3): 103-131, 1976.
14. TRANHAR, W.J. The selective flotation of galena from sphalerite with special reference to the effects of particle size. Int. J. Min. Process., (3): 151-61, 1976.
15. TOMLINSON, H.S. & FLEMING, M.G. Flotation rate studies. In: ROBERT, A. Mineral processing. Oxford, Pergamon Press, 1965 742 p. p. 563-579. (Proceedings of the sixth International Congress, Cannes, May/June 1963).
16. JAMESON, G.J.; NAM, S.; YOUNG, M.M. Physical factors affecting recovery rates in flotation. Min. Sci. Eng., 9 (3): 103-118, 1977.
17. IMAIZUMI, T. & INQUE, T. Kinetic consideration of froth flotation. In: ROBERT, A. Mineral Processing. Oxford, Pergamon Press, 1985, 742 p., p. 581-593. (Proceedings of the sixth International Congress, Cannes, May/June 1963).
18. ARBITER, N. & HARRIS, C. Flotation kinetics. In: FUERSTENAU, D.W. Froth flotation; 50th anniversary volume. New York, AIME, 1962. 677 p. cap. 8, p. 215-246.
19. KLIMEEL, R.R. Selection of chemical reagents for flotation. In: MINERAL PLANT DESIGN. 2 ed. New York, AIME, 1980. p. 907-34.

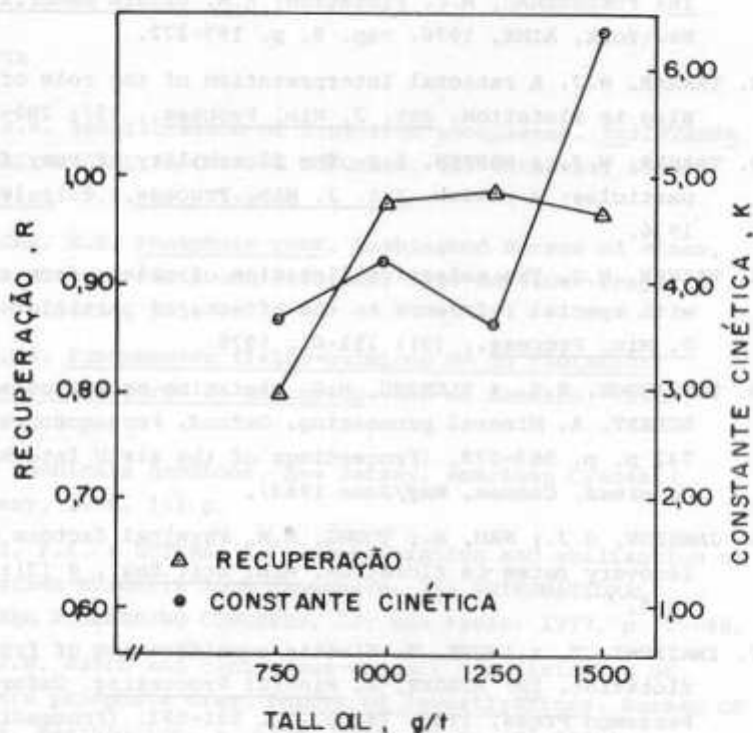


FIG. 1 - EFEITO DO COLETOR TALL OIL NA CINÉTICA DE FLOTAÇÃO DO FOSFATO.

DEMAIS CONDIÇÕES:

Na_2SiO_3 : 200 g/t, AMIDO: 600 g/t

pH=10 (REGULADO COM NaOH)

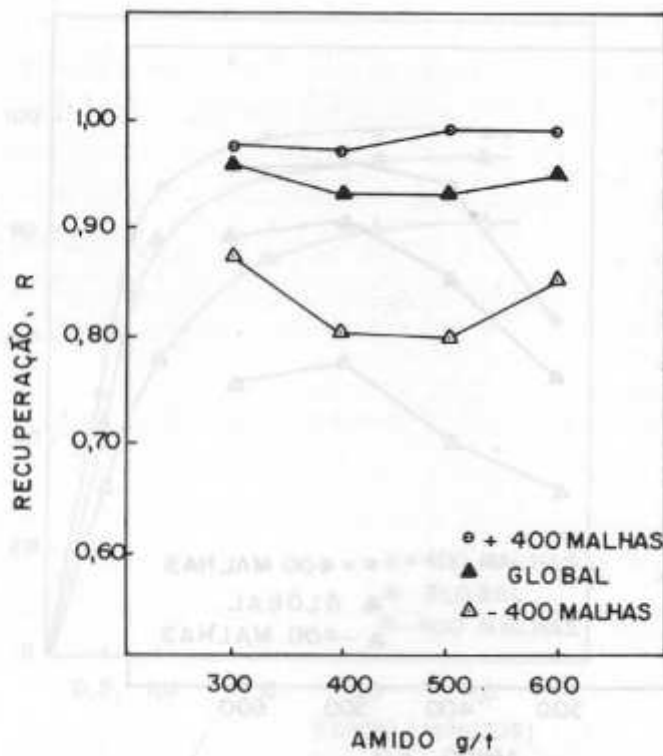


FIG-2 - EFEITO DO AMIDO NA RECUPERAÇÃO MÁXIMA, EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA. DEMAIS CONDIÇÕES: Na_2SiO_3 : 200 g/t, TALL OIL: 1000g/t, pH=10 (REGULADO COM NaOH)

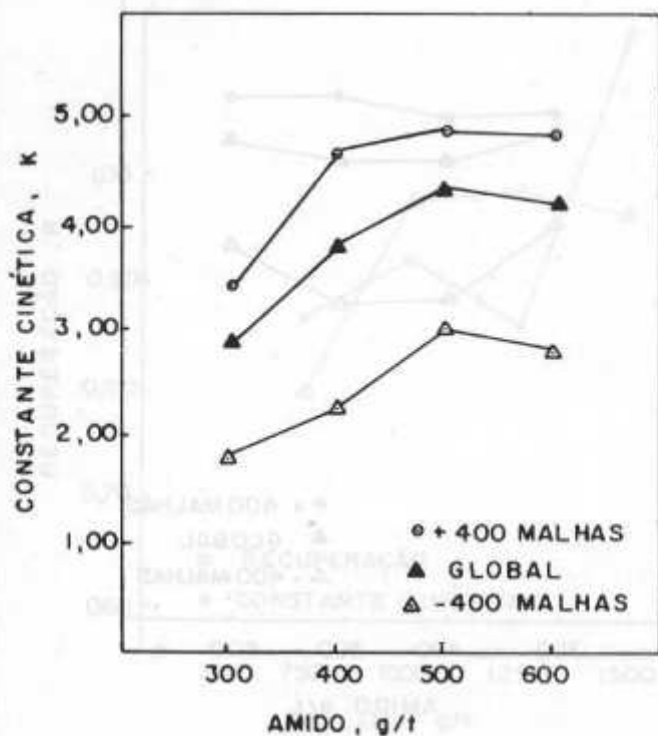


FIG. 3 - EFEITO DO AMIDO NA CINÉTICA DE FLOTAÇÃO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE PARTÍCULA - DEMAIS CONDIÇÕES Na_2SiO_3 : 200 g/t TALLOIL: 1000g/t $\text{pH}=10$ (REGULADO COM NaOH)

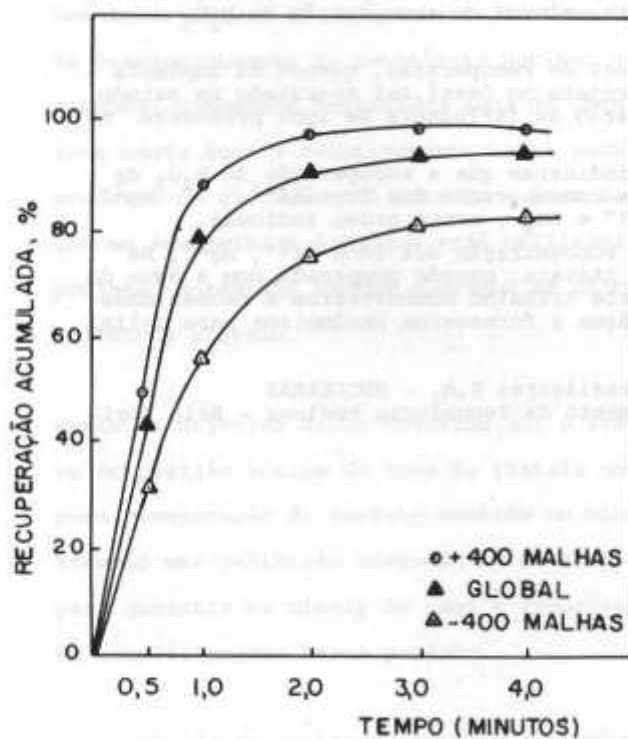


Fig. 4 - EFEITO DA GRANULOMETRIA NA CINÉTICA DE FLOTAÇÃO DO FOSFATO

TALL OIL: 1000 g/t, Na_2SiO_3 : 200 g/t
 AMIDO: 600 g/t, NaOH: 265 g/t