

ESTUDOS DE CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS DE FOSFATO ÍGNEOS DO DEPÓSITO DE EVATE – MOÇAMBIQUE

L.S. LEAL FILHO¹, M. MARTINS¹, H. KAHN¹, K.L.C. GONÇALVES².

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica – Av. Professor Mello Moraes, 2373. Cidade Universitária, São Paulo-SP, Brasil. e-mail: lauleal@usp.br

²Vale – Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) – Santa Luzia-MG, Brasil.

RESUMO

Este trabalho apresenta e discute os resultados obtidos do desenvolvimento de processo conduzido em escala de laboratório, visando concentrar dois tipos de minério que ocorrem comumente no depósito de Evate: um regolito (MT13) e um carbonatito (MT2). Diferentes rotas de processo foram desenvolvidas para preparar e concentrar ambos os minérios. Apatita contida no MT2 foi concentrada com sucesso via flotação aniônica direta em pH=11, após três estágios de flotação: rougher, cleaner-1 e cleaner-2. O esquema de reagentes mais adequado foi composto de amido de milho para deprimir os minerais de ganga e um sarcosinato de cadeia longa para agir como coletor de apatita. Seguindo esta rota de processo, foi possível obter um concentrado apresentando 38% de P₂O₅, acompanhado por uma recuperação em massa de 14% e uma recuperação total de P₂O₅ de 85%. A rota de processo adequada para beneficiar o carbonatito (MT2) falhou completamente quando foi aplicada ao regolito (MT13). Uma nova rota que combinou moagem mais fina, deslamagem e flotação catiônica reversa dos silicatos (estágios rougher e scavenger) e separação magnética de alta intensidade produziu um concentrado de apatita apresentando 34% de P₂O₅, acompanhado por 17% de recuperação em massa e 50% de recuperação total de P₂O₅.

PALAVRAS-CHAVE: Concentração, flotação, separação magnética, fosfatos ígneos.

1. INTRODUÇÃO

Os depósitos ígneos de fosfato são encontrados não somente em rochas frescas primárias (tais como carbonatitos, piroxenitos e glimmeritos) mas também em camadas intemperizadas (regolitos) que recobrem uma “rocha-mãe” primária (Notholt et al, 1989). A complexa distribuição de rochas fosfáticas em um depósito é responsável pela formação de diferentes fácies que podem se comportar diversamente em operações unitárias de processamento mineral (Leal Filho et al, 2010; Kahn et al, 2010).

Particularmente no depósito de Evate-Moçambique, três fácies de rocha fresca primária (carbonatito) foram caracterizadas: MT2, MT9 e MT10. Assim como tipicamente ocorre em áreas tropicais do globo, um manto de rocha intemperizada (regolito) recobre o carbonatito, originando outras quatro diferentes fácies: MT11, MT12, MT13 e MT14 (Kahn e Tassinari, 2009). Este trabalho apresenta os resultados de um estudo conduzido em escala de laboratório, visando o desenvolvimento de um processo para concentrar o minério primário MT2 e o intemperizado MT13, ambos do depósito de Evate.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos Minérios

Resultados de análises químicas relacionadas às amostras da cabeça dos minérios MT2 e MT13 são apresentados na Tabela I. Tais resultados corroboram a composição mineralógica apresentada na Tabela II. Devido à presença no minério de Evate de dois diferentes tipos de minerais contendo fósforo (apatita x Al-fosfatos), o conteúdo total de P_2O_5 ($\%P_2O_{5\text{TOT}}$) deve ser considerado como a soma de duas contribuições: P_2O_5 de apatita ($\%P_2O_{5\text{APA}}$) e P_2O_5 de Al-fosfatos ($\%P_2O_{5\text{FOS}}$), como indicado pela Equação 1.

$$\%P_2O_{5\text{TOT}} = \%P_2O_{5\text{APA}} + \%P_2O_{5\text{FOS}} \quad (1)$$

Cálculos estequiométricos baseados em análises químicas realizadas por EDS/WDS com amostras puras de apatita e Al-fosfatos de Evate, permitiram o desenvolvimento de uma expressão (Equação 2) que pode ser utilizada para calcular $\%P_2O_{5\text{APA}}$ com relação ao $\%CaO$ e $\%P_2O_{5\text{TOT}}$ apresentado por uma amostra.

$$\%P_2O_{5\text{APA}} = \frac{\%CaO - (0,29 \cdot \%P_2O_{5\text{TOTAL}})}{1,03} \quad (2)$$

Tabela I – Composição química das amostras da cabeça.

Elementos	MT2	MT13
$\%P_2O_5\text{ TOTAL}$	6,2	15,1
$\%P_2O_5\text{ APA}$	6,2	12,3
$\%CaO$	44,0	17,1
$\%Fe_2O_3$	10,2	37,1
$\%MgO$	4,6	1,0
$\%Al_2O_3$	0,7	7,1
$\%SiO_2$	3,4	13,0
$\%TiO_2$	0,4	2,1
$\%PF$ (*)	28,2	3,2
SrO	0,5	0,5
F	0,3	0,4
Total	98,5	96,6

(*) Perda de massa por calcinação.

Tabela II – Composição mineralógica dos minérios estudados (-420 μ m +37m).

Minerais	MT2	MT13
Apatita	15	29
Calcita	50	<1
Óxidos de Fe,Ti	22	45
Alumino-fosfatos	<1	14
Dolomita	6	<1
Tecto-silicatos	2	10
Filo-silicatos	1	<1
Piroxênios e Anfibólios	2	<1

Os teores de $P_2O_5_{TOT}$ e $\%P_2O_5_{APA}$ apresentados na Tabela I corroboram os conteúdos de apatita e fosfatos secundários indicados na Tabela II. A amostra de rocha fresca MT2 exibe um valor de $\%P_2O_5_{TOT}$ (6,2%) menor que o da amostra de rocha intemperizada MT13 (15,1%). Este enriquecimento é uma evidência do processo de intemperismo que remove carbonatos por lixiviação, decompõe silicatos ferromagnesianos e promove alteração da apatita em fosfatos secundários (Altschuler, 1973). Além disso, diferentemente da rocha fresca, o regolito MT13 exibe $\%P_2O_5_{TOT}$ (15,1%) maior que $\%P_2O_5_{APA}$ (12,3%) associado a um teor de Al_2O_3 dez vezes maior do que o do MT2 (0,7% versus 7,1%), evidenciando a ocorrência de Al-fosfatos, tais como crandalita e gorceixita (Altschuler, 1973; Kahn et al, 2010).

As conseqüências do processo de intemperismo são evidenciadas pelo conteúdo de contaminantes (Fe_2O_3 , MgO, SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2) em ambos os minérios (Tabela 1). O regolito MT13 é mais rico em Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 e TiO_2 que o carbonatito MT2, enquanto este exibe maiores conteúdos de CaO, MgO e CO_2 (%PF) do que o MT13. Deste modo, a composição química apresentada na Tabela I espelha a composição mineralógica da ganga (Tabela II): carbonatos (calcita e dolomita) compõem a ganga predominante no MT2, enquanto óxidos de Fe,Ti e Al-fosfatos compõem a ganga predominante no MT13.

Resultados dos estudos de MLA, realizados visando à determinação do grau de liberação (LD) das partículas de apatita (-0,420mm +0,037mm), indicam que LD=98% para MT2 e LD=90% para MT13 (Kahn e Tassinari, 2009). A malha de moagem adotada para ambos os minérios levou em consideração a magnitude de seus respectivos LD.

2.2 Preparação dos Minérios e Remoção da Magnetita

Amostras de MT2 e MT13 foram cominuidas abaixo de 1,00mm em circuito fechado com uma peneira de 1,00mm de abertura, como ilustrado na Figura 1 (Rota-1) e Figura 2 (Rota-2). O “undersize” do peneiramento foi denominado “produto cominuido” (PC). As distribuições de tamanho de partículas dos PC obtidos dos minérios MT2 e MT13 são apresentadas nas Figuras 3a e 3b, respectivamente, onde é possível observar que o MT13 apresenta uma quantidade maior de partículas finas.

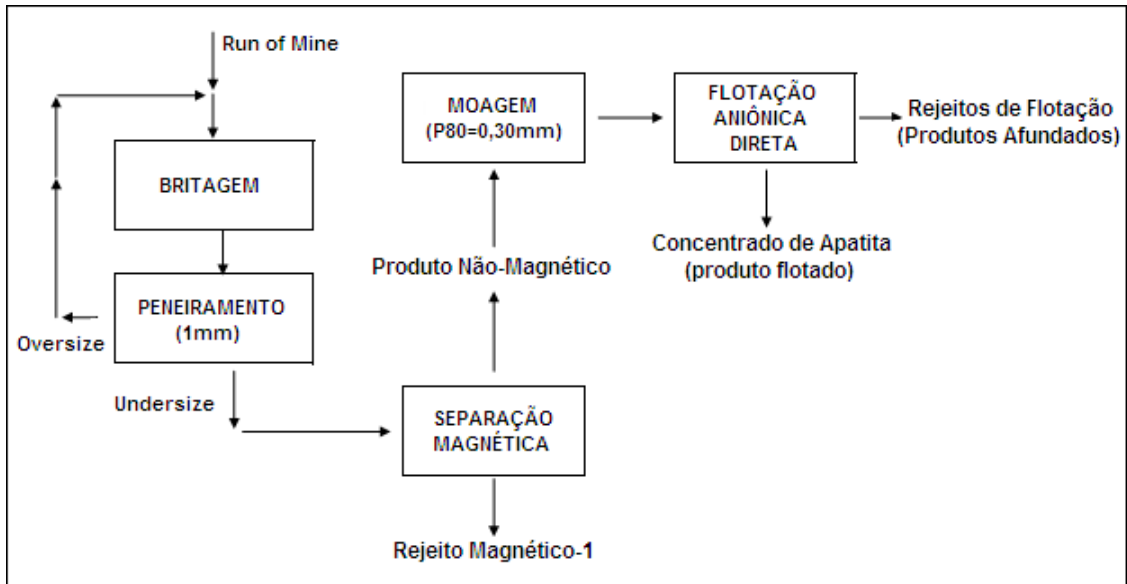


Figura 1 – Rota de processo para beneficiamento do minério MT2 (Rota-1)

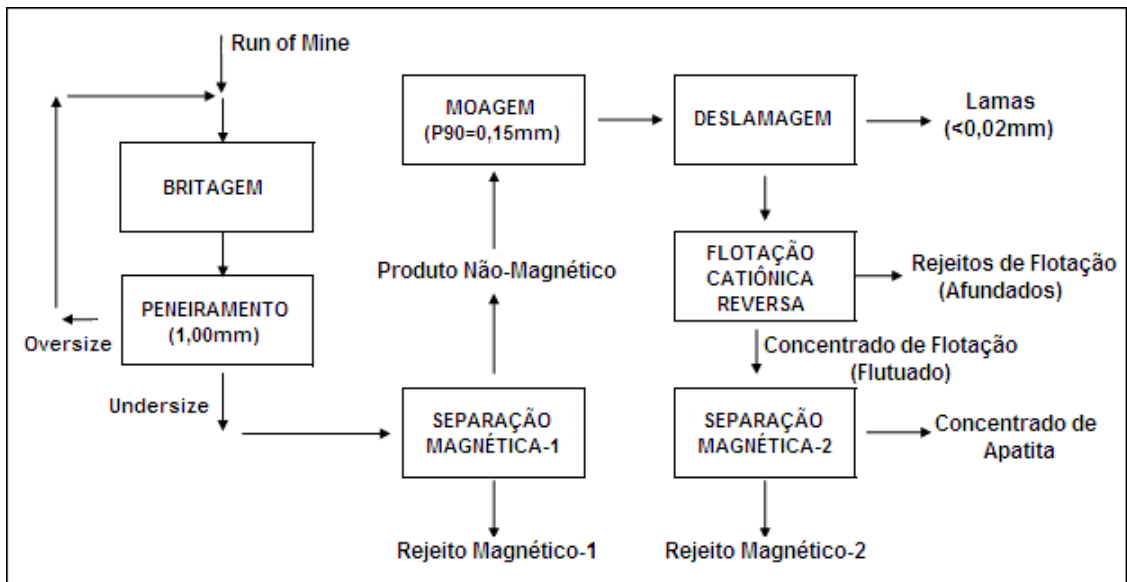


Figura 2 – Rota de processo para beneficiamento do minério MT13 (Rota-2)

Para remover a magnetita do PC obtido do minério MT2 (Figura 1), separação magnética a seco (Separação Magnética-1) foi conduzida em 600 Gauss em separador de tambor. Por outro lado, para remover magnetita do PC obtido a partir do minério MT13 (Figura 2), separação magnética (Separação Magnética -1) foi efetuada em 1.370 Gauss, utilizando-se um separador tambor.

De acordo com as Figuras 1 e 2, os produtos não-magnéticos obtidos pela Separação Magnética-1 foram cominuídos em moinho de bolas para se obter a liberação dos minerais que se deseja flotar: $P_{80}=0,30\text{mm}$ (para MT2) ou $P_{90}=0,15\text{mm}$ (MT13). Distribuições de tamanho de partícula dos produtos moídos são apresentadas nas Figuras 3a e 3b. Devido ao fato do produto cominuído obtido a partir do MT2 na Rota-1 (Figura 3a) ter exibido baixo conteúdo de finos (somente 15% em massa apresentou tamanho de partícula $< 0,020\text{mm}$), não foi necessário efetuar deslamagem antes da flotação. Por outro lado, o produto cominuído obtido a partir do MT13 na Rota-2 (Figura 3b), devido à considerável quantidade de finos presentes (22% da massa apresentou tamanho de partícula $< 0,020\text{mm}$), foi necessário realizar a deslamagem da amostra antes dos ensaios de flotação.

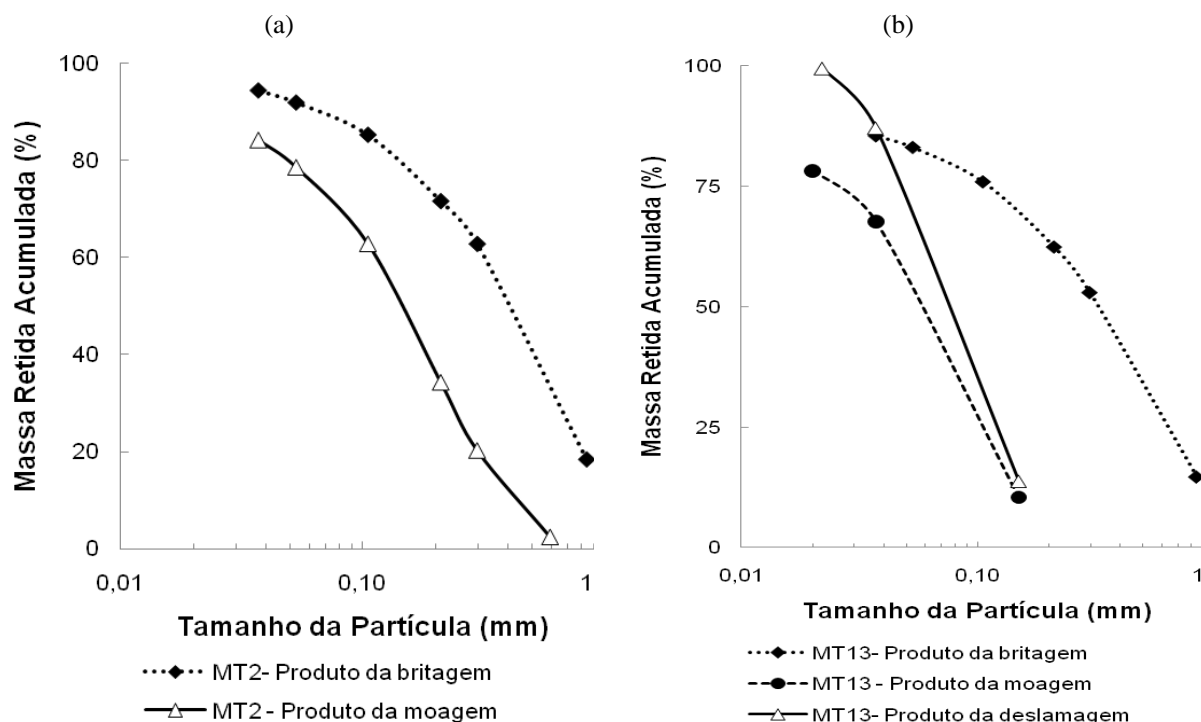


Figura 3 – Distribuição de tamanho de partícula dos produtos gerados pela preparação dos minérios: (a) MT2 (rota-1) e (b) MT13 (rota-2).

2.3 Ensaios de Flotação

Concentração de apatita a partir da rocha fresca MT2

Como pode ser observado na Figura 1, após a preparação da amostra de rocha fresca (MT2), flotação aniônica direta da apatita foi conduzida com polpa preparada com 500g de minério mais 350g de água (25°C), obtendo-se 59% de sólidos (em massa). Para deprimir os carbonatos, amido de milho (Amidex® 3001, fornecido pela Corn Products) versus um polímero derivado de celulose (Depramin® 267, fornecido pela Akzo Nobel) foram adicionados à polpa e condicionados por 5 minutos. Para tornar as partículas de apatita hidrofóbicas, coletor foi adicionado à polpa e condicionado por 2 minutos. Após o condicionamento dos reagentes, 817g de água foram adicionados à polpa de modo a se obter 30% de sólidos (em massa). O valor de pH desejado para cada teste foi ajustado, adicionando-se hidróxido de sódio à polpa. Flotação foi executada até exaustão da espuma mineralizada. O produto que flutuou durante a etapa rougher (1,2 min.) foi lavado pela etapa Cleaner-1 (0,7min.). A espuma produzida no primeiro cleaner foi submetida a uma segunda etapa de limpeza por 0,5 min. (Cleaner-2). Para otimizar as condições de espuma, 17g/t de metil isobutil carbinol foi adicionado à polpa no estágio rougher. Os produtos obtidos foram desaguados, secados, pesados e analisados quimicamente por fluorescência de raios-X.

Concentração de apatita a partir da rocha intemperizada MT13

A flotação catiônica reversa dos silicatos foi conduzida com polpa preparada com 1000g de minério mais 2334g de água (25°C), obtendo-se 30% de sólidos (em massa). Os melhores resultados foram obtidos com 480g/t de alquil éter amina (Flotigan EDA, fornecida pela Clariant) em pH=10,5 no estágio rougher, após 2,5 minutos de flotação. A espuma produzida pelo estágio rougher foi submetida a um estágio scavenger complementar por 2 minutos, em pH=9,8 (natural), sem adição extra de coletor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Concentração de Apatita a partir da Rocha Fresca

O balanço de massa-metalúrgico global da rota de beneficiamento (Rota-1) aplicada ao carbonatito MT2 é apresentado na Tabela III, onde se observa que o rejeito magnético da Separação Magnética-1 apresentou 65,47% de Fe_2O_3 e 0,89% de P_2O_5 , acompanhado pelas recuperações de Fe_2O_3 de 84,0% e de apenas 1,6% de P_2O_5 .

Tabela III – Balanço metalúrgico da Rota-1 aplicada ao MT2.

Produtos	Composição química (%)		Recuperação (%)		
	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Massa	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
Concentrado de apatita (Flotação) (*)	38,10	0,17	13,9	85,2	0,3
Rejeito da flotação	1,10	1,96	74,3	13,2	15,7
Rejeito magnético	0,89	65,47	11,8	1,6	84,0
Alimentação (calculada)	6,22	9,16	100,0	100,0	100,0

(*) %CaO=52,90; %F=1,90; %MgO=1,01; %Al₂O₃=0,27; %SiO₂=0,50; %BaO=0,14.

Ainda de acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, a Rota-1 (Figura 1) foi capaz de produzir um concentrado de apatita (Cleaner-2) apresentando 38,10% de P₂O₅, 1,90% de F, 52,90% de CaO e 1,01% de MgO, indicando que a separação apatita versus carbonatos (calcita e dolomita) por flotação foi adequada. Além disso, o concentrado final de apatita apresentou baixo conteúdo de Al₂O₃, SiO₂ e Fe₂O₃, sinalizando que as separações apatita/silicatos e apatita/óxidos também foram adequadas. Embora a recuperação em massa tenha sido baixa (13,9%), a recuperação de P₂O₅ foi consideravelmente alta (85,2%).

A respeito da depressão dos carbonatos, uma dosagem de 200-300g/t de Amidex[®] (amido de milho) foi capaz de produzir maior recuperação de P₂O₅ (apatita) e menor recuperação de MgO (dolomita) em comparação ao Depramin[®] 267 (200g/t). Calcita foi muito bem deprimida pelo amido de milho e as razões são apresentadas e discutidas em outro trabalho (Leal Filho et al, 2000). Uma vez que o Amidex[®] apresenta menor custo comparado ao Depramin[®] 267, ele é a melhor opção para deprimir os minerais de ganga no presente trabalho (principalmente carbonatos). Após testar os diferentes tempos de condicionamento (2,5 min. x 5,0 min. x 7,5 min.) para ambos depressores, observou-se que o tempo de 5,0 min. promoveu o melhor desempenho de flotação, sendo escolhido como o tempo de condicionamento padrão para a depressão da ganga. Resultados de ensaios de flotação realizados para determinar o melhor pH de condicionamento do depressor apontam o pH=11,0 como sendo o mais indicado para esta aplicação (Leal Filho et al 2010).

Três famílias de surfatantes de cadeia longa foram testados para tornar a superfície da apatita hidrofóbica: oleato de sódio (grau analítico), sarcosinato de sódio e sulfosuccinato de sódio (ambos fornecidos pela Akzo Nobel). Entretanto, somente o coletor do tipo sarcosinato (MD20359) foi capaz de apresentar bom desempenho em água dura ([Ca] = [Mg] = 3,2x10⁻³ mol/dm³), conforme resultados apresentados na Tabela IV. Uma dosagem de 150g/t do coletor MD20359, condicionado por 2 minutos, forneceu os melhores resultados de flotação: um concentrado (cleaner-2) contendo 37,5% de P₂O₅ e 1,16% de MgO, acompanhado por uma recuperação em massa de 11,7% e recuperação de P₂O₅ de 86,1%. É importante ressaltar que, desde 1990, um surfatante similar (Berol 867) tem sido utilizado com sucesso como agente coletor para a apatita da mina de Cajati-SP. Características mineralógicas e texturais muito similares apresentadas por ambos carbonatitos (Ebate x Cajati) dão suporte para a escolha do MD20359 como o coletor mais adequado para a presente aplicação. Os mecanismos que explicam a capacidade proeminente dos coletores do tipo sarcosinato, tais como o MD20359 e o Berol 867, para proporcionar alta seletividade na separação apatita/carbonatos na presença de água dura são encontrados nos trabalhos de Buttner (1987) e Schroder (1987). Além disso, resultados de ensaios adicionais de flotação visando determinar o pH mais apropriado para o condicionamento do coletor e flotação rougher mostraram que os valores entre 10,5 ≤ pH ≤ 11,0 resultaram no melhor desempenho de flotação. Por outro lado, nenhum modificador de pH foi adicionado aos estágios cleaner de flotação. Deste modo, pH=10,5 (cleaner-1) e pH=9,7 (cleaner-2) foram os valores naturais do pH da polpa no qual a flotação foi conduzida.

Tabela IV – Desempenho da flotação do MT2 usando coletores aniônicos de cadeia longa (150g/t) na presença de água dura (*), amido=300g/t, pH=11,0.

Coletores	Composição química do concentrado de apatita (%)		Recuperação (%)		
	P ₂ O ₅	MgO	Massa	P ₂ O ₅	MgO
Alquil sarcosinato (MD20359)	37,5	1,16	11,7	86,1	4,2
Oleato (Grau analítico)	7,8	4,25	11,2	12,9	11,0
Alquil sulfosuccinato (MDB811)	8,6	5,01	8,1	10,4	9,4

(*) Concentração de cálcio = concentração de magnésio = $3,2 \times 10^{-3}$ mol/dm³.

3.2 Concentração de Apatita a partir de Rocha Intemperizada

A primeira tentativa de se preparar e concentrar a amostra de regolito (MT13) foi seguir os mesmos procedimentos (Figura 1) utilizados com sucesso para a amostra de carbonatito (MT2). Entretanto, tal rota falhou em concentrar apatita do MT13, produzindo um concentrado pobre de apatita (%P₂O₅ =19,4%), acompanhado por uma recuperação de P₂O₅ extremamente baixa (2,3%). Ensaios adicionais de flotação, explorando outros coletores aniônicos (ácidos graxos e alquil sulfosuccinatos) em uma larga escala de concentração e pH, também produziram concentrados de apatita muito pobres. Para otimizar as condições de espuma, os finos foram removidos previamente à flotação, mas concentrados pobres continuaram a ser produzidos, indicando que a amostra de rocha intemperizada (MT13) necessitava de uma rota de beneficiamento mais apropriada.

De acordo com a nova rota de beneficiamento, a remoção de magnetita antes da concentração de apatita (Separação Magnética-1) foi realizada por separação magnética a úmido em 1.370 Gauss. Para otimizar a concentração da apatita, flotação catiônica reversa dos silicatos foi introduzida. Resultados preliminares de flotação, embora não muito ruins, indicaram a necessidade de uma cominuição mais fina (P₉₀=0,15mm) para otimizar a liberação dos silicatos vis-à-vis apatita e, deste modo, produzir concentrados de apatita apresentando %P₂O₅ maior que 30%. Após deslamagem do produto cominuído, experimentos de flotação catiônica reversa dos silicatos foram conduzidos. Com o intuito de aumentar o conteúdo de P₂O₅ no concentrado de apatita produzido pela flotação catiônica, separação magnética de alta intensidade a úmido foi realizada em 9.000 Gauss (Separação Magnética-2).

Estes novos procedimentos adotados para preparação (Separação Magnética -1, moagem mais fina e deslamagem) e concentração de apatita (flotação catiônica reversa dos silicatos mais Separação Magnética -2) caracteriza a nova rota de beneficiamento (Rota-2) a qual é ilustrada na Figura 2. De acordo com os resultados apresentado na Tabela 5, a rota-2 foi capaz de produzir um concentrado de apatita (Produto não-magnético produzido pela Separação Magnética-2) apresentando 34,24% de P₂O₅APA, 1,90% de F, 45,50% de CaO e 0,28% de MgO. Entretanto, os altos conteúdos de SiO₂ (7,26%), Fe₂O₃ (2,78%) e Al₂O₃ (2,48%) no concentrado final de apatita, associados à alta perda de P₂O₅ nos rejeitos de flotação (23,4%) e nos finos (20,8%) sinalizam a necessidade de otimização do processo.

Tabela V – Balanço metalúrgico da Rota-2 aplicada ao MT13.

Produtos	Composição química (%)		Recuperação (%)		
	P ₂ O ₅ APA	Fe ₂ O ₃	Massa	P ₂ O ₅ APA	Fe ₂ O ₃
Concentrado de apatita (*)	34,24	2,78	16,9	50,0	1,4
Rejeito da flotação	14,45	2,77	18,8	23,4	1,6
Rejeito magnético -1	1,24	60,27	49,2	5,3	90,4
Rejeito magnético -2 (**)	1,61	31,20	3,9	0,5	3,7
Lamas	21,49	8,42	11,2	20,8	2,9
Alimentação (calculada)	11,59	32,80	100,0	100,0	100,0

(*) %CaO=45,50; %MgO=0,28; %Al₂O₃=2,48; %SiO₂=7,26; %TiO₂=1,00; %P₂O₅FOS= 1,06%.

(**) %P₂O₅FOS= 13,43; %Al₂O₃=17,53.

4. CONCLUSÕES

Estudos de desenvolvimento de processo visando à concentração de um regolito (MT13) e um carbonatito (MT2) provenientes do depósito de fosfato de Evate foram conduzidos em escala de laboratório. Distintas rotas de beneficiamento foram desenvolvidas para se ajustar às características de cada minério em particular.

A apatita da amostra MT2 foi concentrada com sucesso via flotação aniônica direta em pH=11, após três estágios de flotação: rougher, cleaner-1 e cleaner-2. O esquema de reagentes mais adequado foi composto de amido de milho para deprimir os minerais e um sarcosinato de cadeia longa para atuar como agente coletor. Seguindo esta rota de processo, foi possível obter um produto concentrado apresentando 38% de P₂O₅ acompanhado por uma recuperação mássica de 14% e uma recuperação total de P₂O₅ de 85%.

Com relação ao MT13, a rota de concentração mais adequada combinou a flotação catiônica reversa dos silicatos (estágios rougher e scavenger) com separação magnética de alta intensidade. Seguindo esta rota, um concentrado de apatita apresentando 34% de P₂O₅ foi obtido, acompanhado por 17% de recuperação em massa e 50% de recuperação total de P₂O₅.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento à Vale pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho e permissão para a publicação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- Altschuler, Z.S., 1973. The weathering of phosphate deposits – Geochemical and environmental aspects. In: Environmental phosphorus handbook, eds E.J. Griffith, A. Beeton, J.M. Spencer, D.T. Mitchell. New York, John Willey & Sons, pp. 33-95.
- Buttner, B., 1987. Selektive flotation des carbonatitischen phosphaterzes von jacupiranga und untersuchungen zur adsorption der spezifischen reagenzien auf apatit und calcite. Ph.D. thesis, University of Clausthal, Germany (text in German).
- Kahn, H.; Tassinari, M.M.M.L., 2009. Caracterização de amostras de minério fosfático. Report LCT-054/08. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (text in Portuguese).
- Kahn, H.; Sant'Agostino, L.M.; Tassinari, M.M.M.L.; Ulsen, C.; Braz, A.B., 2010. Apatite from alkaline complexes - behavior in mineral processing and characterization. In Beneficiation of Phosphates: technology advance and adoption, eds. P. Zhang, K. Swager, L. Leal Filho and H. El-Shall. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., pp. 53-63.
- Leal Filho, L.S.; Assis, S.M.; Barros, L.A.F.; Peres, A.E.C., 2002. Activation and depression of silicates during anionic flotation of igneous apatites, in Beneficiation of Phosphates: Fundamentals and Technology, eds. P. Zhang, H. El-Shall, P. Somasundaran and R. Stana. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. pp 55-65
- Leal Filho, L.S.; Martins, M.; Horta, D.G., 2010. Concentration of igneous phosphate ores via froth flotation: challenges and developments. Brisbane, *Proceedings of the XXV International Mineral Processing Congress*.
- Leal Filho, L.S.; Martins, M.; Albino, K.I.P.; Marques, C.V.P.; Silva, M.A., 2010. Concentração de minérios de fosfato da jazida de Evate: relatório final. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (text in Portuguese).
- Leal Filho, L.S., Seidl, P.R., Correia, J.C.G.; Cerqueira, L.C.K., 2000. Molecular modeling of reagents for flotation processes, *Minerals Engineering*, 13: 1495-1503.
- Notholt, A.J.G.; Sheldon, R.P.; Davidson, D.F., 1989. Phosphate deposits of the world. London, Cambridge University Press.
- Schröder, H., 1987. Untersuchungen zur adsorption von ampholyttensiden und deren mischungen mit einem nichtionogenen, polar-unpolaren tensid auf apatit und scheelit. Ph.D. thesis, University of Clausthal, Germany (text in German).