

## **FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE MINERAL VISANDO À MELHORIA DO PROCESSO DE FLOTAÇÃO DE APATITA**

**SANTOS, M.A.<sup>1</sup>, SANTANA, R.C.<sup>1</sup>, CAPPONI, F., ALMEIDA, D.M.<sup>1</sup>, ATAIDE, C.H.<sup>1</sup>,  
BARROZO, M.A.S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia. marialves84@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia. masbarrozo@ufu.br

### **RESUMO**

As indústrias do setor mineral enfrentam atualmente uma grande dificuldade relacionada à obtenção de índices de rendimento economicamente viáveis, já que utilizam cada vez mais fontes de águas primárias com altos níveis de salinidade ou, então, altas proporções de água reciclada proveniente de bacias de rejeitos. Esta pode conter quantidades consideráveis de espécies dissolvidas, reagentes residuais como coletores, depressores, ativadores, floculantes, material particulado, etc., o que pode afetar significativamente os custos e a eficiência do processo. O presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito da qualidade da água na concentração da rocha fosfática. Para a realização de experimentos de flotação de apatita foi utilizada: água nova, água de processo (proveniente da barragem de rejeitos de indústria de fertilizantes) e água de processo previamente tratada por flotação por ar dissolvido (FAD). Os resultados obtidos apontaram uma queda de aproximadamente 38% na recuperação de apatita quando foi utilizada água da barragem nos testes de flotação em batelada. O tratamento de efluentes via FAD da água de processo proporcionou uma melhora na recuperação de apatita, atingindo valores superiores a 60%, equiparando-se aos resultados obtidos quando se utilizou água nova. O tratamento do efluente mineral mostrou-se satisfatório proporcionando uma melhoria na qualidade do processo de flotação.

**PALAVRAS-CHAVE:** reuso; água; influência de íons; rendimento; flotação.

### **ABSTRACT**

Currently, the mineral sector industries face a major difficulty related to obtaining yield indices economically viable, since they are increasingly using primary sources of water with high levels of salinity or high proportions of recycled water from tailing ponds. The latter may contain considerable amounts of dissolved species, residual reagents as collectors, depressants, activators, flocculants, particulate matter, etc., which can significantly affect the process cost and efficiency. Therefore, the aim of this study was to analyze the effect of water quality on the concentration of phosphate rock. In this work, it was used for the experiments of apatite flotation: fresh water, process water (from tailing ponds of fertilizer industry) and previously treated process water by dissolved air flotation (DAF). The results obtained showed a decrease of about 38% in the apatite recovery when it was utilized the tailing dam water in the batch flotation tests. The wastewater treatment by FAD from process water provided an improvement in the apatite recovery, reaching values over 60%, equating to the results obtained when it was used fresh water. The treatment of mineral effluent was satisfactory providing an improvement in the quality of flotation process.

**KEYWORDS:** reuse; water; influence of ions; yield; flotation.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo mais utilizado na concentração do minério fosfático é a flotação, que consiste em separar os minerais de interesse dos minerais de ganga. Vários fatores podem influenciar o desempenho da flotação de fosfatos, particularmente a presença de espécies iônicas ou orgânicas dissolvidas na água. Entretanto, poucos estudos retratam o efeito da qualidade da água na flotação de apatita.

Cálcio, fosfato, magnésio e fluoreto interferem significativamente na eficiência do processo de flotação de apatita, prejudicando a recuperação, teor e seletividade do processo (SANTOS *et al.*, 2010, SANTOS *et al.*, 2012b). A dificuldade em atingir bons níveis de rendimento metalúrgico de apatita aumenta quando, além de espécies iônicas provenientes da dissociação mineral, há a utilização da água de processo (recirculada) na flotação, caracterizada pelo alto teor de sais dissolvidos, íons metálicos, reagentes do processo e material particulado suspenso (SIS e CHANDER, 2003; GUIMARÃES e PERES, 1999).

As atividades de lavra e beneficiamento mineral utilizam grandes volumes de água, normalmente descartados em bacias de rejeitos, transportando diversos contaminantes (óleos, reagentes químicos, íons) gerados nas etapas de perfuração, desmonte e transporte de minério (OLIVEIRA e LUZ, 2001). Por sua vez, seja por restrições econômicas e/ou ambientais, uma proporção significativa desta água vem sendo reutilizada nas operações de processamento mineral sem que esta seja previamente tratada, impedindo um rendimento satisfatório da flotação mineral.

A necessidade de se obter teores adequados no concentrado de apatita e menores perdas de fósforo, demanda a utilização de uma água de melhor qualidade. Além disso, existe uma preocupação crescente com o impacto das atividades de mineração sobre o meio ambiente. Ante as restrições ambientais cada vez mais rigorosas quanto ao descarte de efluentes e o elevado custo de água nova, devido à escassez deste recurso, tornam-se necessários investimentos para otimizar seu uso/reuso.

Neste contexto, o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) para tratar a água proveniente de processo tem se mostrado uma tecnologia eficiente e promissora. Reconhecida como um método de separação de partículas no início do século XX, desde então tem sido aplicada em diversas áreas no tratamento de efluentes industriais (RUBIO *et al.*, 2002).

No processo FAD, a geração de bolhas é feita por saturação de parte do efluente com ar em tanques a pressões superiores à pressão atmosférica, seguido de uma descompressão súbita em uma válvula tipo agulha ou em dispositivos de constrições de fluxo. Neste processo, são geradas bolhas de tamanho reduzido, na faixa de 30 a 100  $\mu\text{m}$ . (RODRIGUES e RUBIO, 2003; RODRIGUES e RUBIO, 2007).

Uma vez que se torna inviável a utilização somente de água nova nas indústrias, a água reciclada é de uso indispensável nas indústrias que beneficiam o minério fosfático. Sendo assim, fica clara a necessidade de estudos relacionados ao tratamento de efluente mineral visando à redução de contaminantes, seja para reuso com uma água de melhor qualidade ou para retorná-la ao meio ambiente nas mesmas condições daquela captada para o processo. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do tratamento da água de processo via FAD na melhoria do processo de flotação de apatita.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Tratamento do efluente via FAD

Para este estudo, a empresa Vale Fertilizantes (Unidade de Araxá – MG) disponibilizou a amostra de efluente real da mineração de fosfato que foi utilizada nos experimentos. Esta água de processo tem a mesma origem daquela alimentada na usina de beneficiamento da rocha fosfática.

Na etapa de pré-tratamento foi utilizado como agente coagulante sulfato de alumínio hidratado P.A. ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (14-18)\text{H}_2\text{O}$ ) da VETEC e como agente floculante (aniônico) Praestol®, (copolímero de acrilamida e acrilato de sódio), da Ashland. Soluções de hidróxido de sódio (10%) e ácido clorídrico (6M) foram utilizados na regulagem do pH da água a ser tratada.

O esquema da unidade experimental na qual a amostra foi tratada por meio do processo FAD está ilustrado na Figura 1. Anteriormente à etapa de FAD foi feito um pré-tratamento, no qual a coluna foi preenchida com 1 L da água de processo onde foi mantida em agitação rápida com o auxílio de um agitador magnético. Então, ajustou-se o pH da solução conforme valor pré-estabelecido em estudos anteriores, 6 ou 11, (pH inicial da água de processo em torno de 7,3) e adicionou-se o coagulante, mantendo sob a agitação rápida por 1 min. A rotação foi reduzida (mistura lenta) e então, foi adicionado o floculante ficando sob agitação por 2 min. Cessado este tempo, a agitação foi interrompida e o líquido saturado com ar, procedente do tanque de pressurização, foi liberado na coluna através de uma válvula agulha. A vazão de água saturada com ar foi fixada numa razão de reciclo de 20%, definida segundo a Equação 1 (ZOU BOLIS e AVRANAS, 2000), promovendo, assim, o processo de flotação.

$$R_R(\%) = \left( \frac{V - V_0}{V_0} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

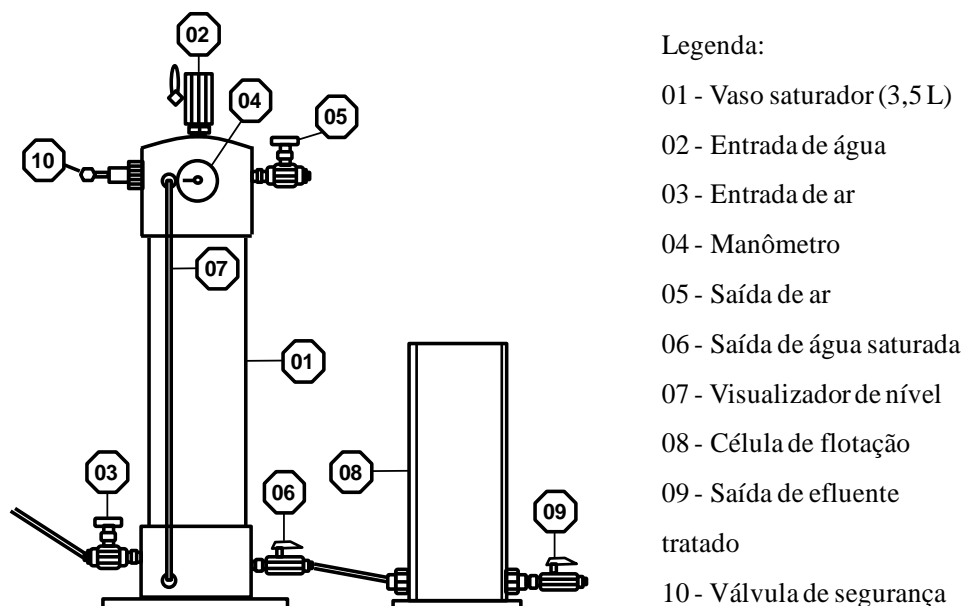


Figura 1. Representação esquemática da unidade experimental de FAD.

Foi utilizada uma pressão de saturação de  $5 \text{ kgf/cm}^2$ , baseado em estudos de caracterização de tamanho de bolhas (RODRIGUES e RUBIO, 2003, NUNES *et al.*, 2007), onde os autores relatam que acima de  $4 \text{ kgf/cm}^2$  não há mais variação no tamanho de bolha. Finalizado o teste, amostras do

clarificado foram coletadas para que a próxima etapa do estudo fosse feita, qual seja a flotação de apatita em coluna convencional.

## 2.2. Flotação de apatita em coluna convencional

Testes de flotação de apatita em coluna foram realizados em duplicata utilizando água nova (água de abastecimento público), água de processo (barragem B5, sem tratamento) e água de processo tratada via FAD em diferentes condições experimentais para avaliar o efeito da qualidade da água no desempenho do processo de concentração de apatita.

A Tabela I apresenta as condições experimentais das águas utilizadas durante o processo de flotação de apatita, sendo que os códigos AN e AB se referem aos testes utilizando água nova e de processo, respectivamente, portanto, que não passaram pelo tratamento via FAD. As concentrações de coagulante e floculante utilizadas nos experimentos para o tratamento do efluente (água de processo) também são apresentadas na Tabela 1. Os códigos AT1 e AT2 referem-se aos testes cujo efluente passou por um tratamento simples de FAD (etapa única). Os códigos AT3, AT4 e AT5 referem-se às águas tratadas cujo tratamento de efluente foi realizado em duas etapas FAD, ou seja, o efluente tratado na primeira etapa passou por um segundo tratamento via FAD (2ª etapa - polimento). Isto ocorreu devido ao fato do íon fosfato não ser removido em uma etapa única em pH 6. Ademais, apenas uma etapa em pH 11 não favorecia a remoção de cálcio, conforme conjunto de experimentos realizados anteriormente (SANTOS *et al.*, 2012a).

Para a realização dos testes de flotação foi utilizado o minério de granulometria grossa (-150 µm) proveniente da alimentação do circuito de grossos da Vale Fertilizantes (Araxá – MG). Os reagentes utilizados durante o condicionamento do minério foram o óleo de soja saponificado como coletor de apatita a 2,5%, fubá de milho gelatinizado como depressor de ganga a 3% e solução de NaOH a 10 % como regulador de pH.

**Tabela I. Condições experimentais das águas utilizadas durante o processo de flotação de apatita.**

Código teste de flotação	Água	Coagulante [1ª FAD] (mg/L)	Coagulante [2ª FAD] (mg/L)	Floculante [1ª FAD] (mg/L)	Floculante [2ª FAD] (mg/L)	pH [1ª FAD]	pH [2ª FAD]
AN	nova	-	-	-	-	-	-
AB	barragem	-	-	-	-	-	-
AT1	tratada	500	-	2	-	6	-
AT2	tratada	500	-	2	-	11	-
AT3	tratada	300	300	2	2	6	11
AT4	tratada	500	200	2	2	6	11
AT5	tratada	700	100	2	2	6	11

A Figura 2 mostra a representação esquemática da unidade experimental da coluna de flotação mineral, construída em material acrílico, possuindo altura total de 1,5 m e diâmetro interno de 40 mm. Foi utilizado 340 g de minério para cada experimento, sendo que a porcentagem de sólidos durante condicionamento foi mantida em 60% a pH de 11,5. A dosagem de coletor e depressor foram de 240 e 200 g/t, respectivamente, sendo necessário um tempo de condicionamento de 5 min para cada reagente.

A alimentação da polpa na coluna de flotação exigia uma concentração de sólidos em torno de 14%. As vazões de ar, de água de lavagem e de reciclo foram fixadas em 80 L/h, 0,15 L/min e 0,5 L/min, respectivamente.

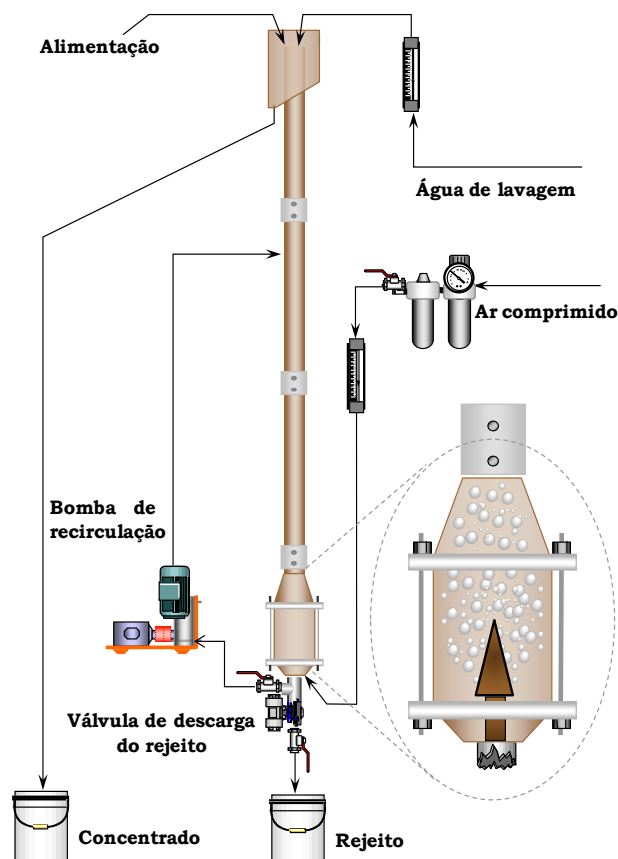


Figura 2. Representação esquemática da unidade experimental de flotação de apatita.

### 2.3. Avaliação dos resultados de flotação

As amostras do resultado da flotação, i.e., do concentrado e do rejeito foram submetidas a uma análise química (Espectrometria de Fluorescência de Raios X). Estas análises foram realizadas pela Vale Fertilizantes (Araxá-MG). O efeito da adição dos íons contaminantes foi avaliado a partir dos resultados de recuperação de apatita e do teor de  $P_2O_5$ . O teor  $P_2O_5$  foi obtido pela técnica de Fluorescência de Raios X, enquanto a recuperação de apatita foi dada pela Equação 2 a seguir.

$$R = \frac{M_F \cdot X_{\text{apatita},F}}{M_A \cdot X_{\text{apatita},A}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:  $M_F$  = massa de flotado  
 $M_A$  = massa alimentada  
 $X_{\text{apatita},F}$  = teor de apatita no flotado  
 $X_{\text{apatita},A}$  = teor de apatita na alimentação

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os trabalhos anteriores (SANTOS *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2010), constatou-se que íons como fluoreto, cálcio, magnésio e fosfato contribuem expressivamente para o prejuízo da flotação de apatita, ou seja, acarretam a diminuição da recuperação e teor de  $P_2O_5$ , além da queda na seletividade do processo.

Testes de flotação de apatita realizados utilizando água nova (AN) (água de abastecimento público) resultaram em um valor médio de 63,6% de recuperação de apatita e de 33,6% de teor de  $P_2O_5$  (Figura 3). Tais valores são considerados aceitáveis nas usinas de concentração de fosfato (recuperação e teor acima de 60 e 33%, respectivamente) e servem como referência de qualidade para o processo de flotação de apatita. As concentrações medidas de cálcio, magnésio, fosfato e fluoreto na água de processo (água da barragem B5 da Vale Fertilizantes) foram, de aproximadamente, 35, 15, 33 e 2,3 mg/L, respectivamente.

Pode-se observar, na Figura 3, que os testes que foram realizados utilizando a água de processo (AB) resultaram em valores médios de recuperação de apatita e teor de  $P_2O_5$  de 39,5 e 31,3%, respectivamente. Isto implica em uma queda de aproximadamente 38% na recuperação e de 7% no teor, evidenciando que a produtividade e a qualidade da flotação não apresentam resultados satisfatórios quando se utiliza esse tipo de água. Tal fenômeno ocorre em virtude de íons cálcio e magnésio consumirem o coletor disponível para a coleta das partículas de apatita, enquanto que os íons fluoreto e, principalmente, o fosfato serem depressores da fluorapatita (mineral da família da apatita predominante nos depósitos de Araxá –MG) (SANTOS *et al.*, 2012; SIS e CHANDER, 2003; GUIMARÃES e PERES, 1999).

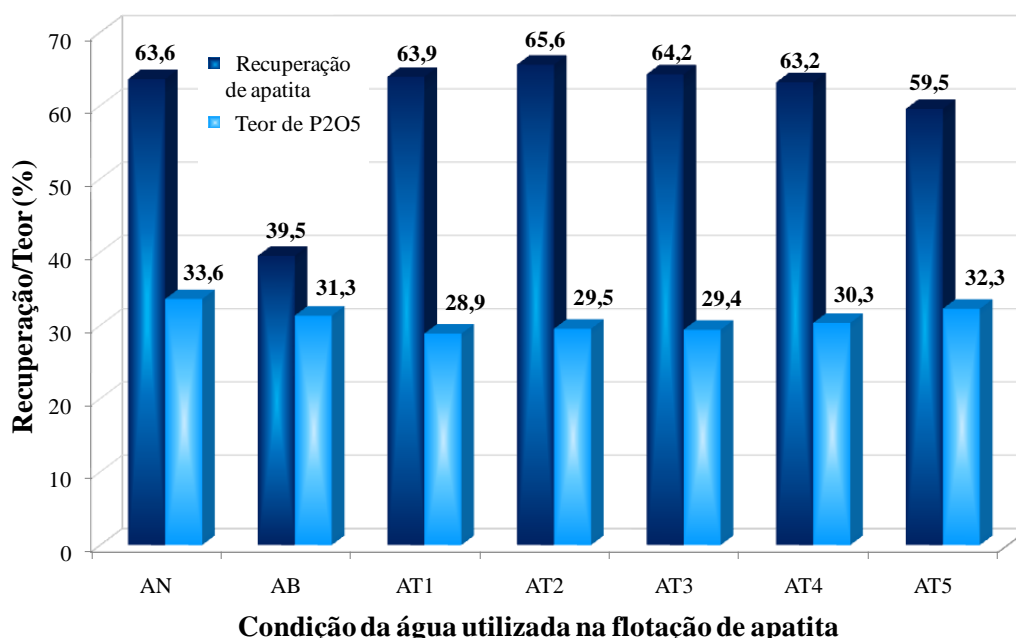


Figura 3. Influência da água na recuperação de apatita e teor de  $P_2O_5$ .

Nota-se que os ensaios de flotação realizados com água tratada por flotação por ar dissolvido (AT1, AT2, AT3, AT4, AT5), nas diferentes condições já citadas na Tabela 1, implicaram em valores médios de recuperações acima de 60% ou muito próximo a este valor. Tais valores são considerados estatisticamente iguais àquele valor de recuperação para o teste realizado com água nova (AN), exceto para o teste AT5, considerado os testes de hipóteses realizados com nível de significância (probabilidade máxima de erro do teste de 5%).

Tais resultados permitem dizer que a técnica de coagulação-floculação seguida de FAD mostrou-se satisfatória na remoção, ainda que parcial, dos íons fluoreto, cálcio, magnésio e fosfato. Entretanto, a eficiência de remoção de material particulado suspenso foi excelente, (alcançando valores de 99,3%) uma vez que diminuiu consideravelmente a turbidez da água de processo, conforme ilustrado na Figura 4.

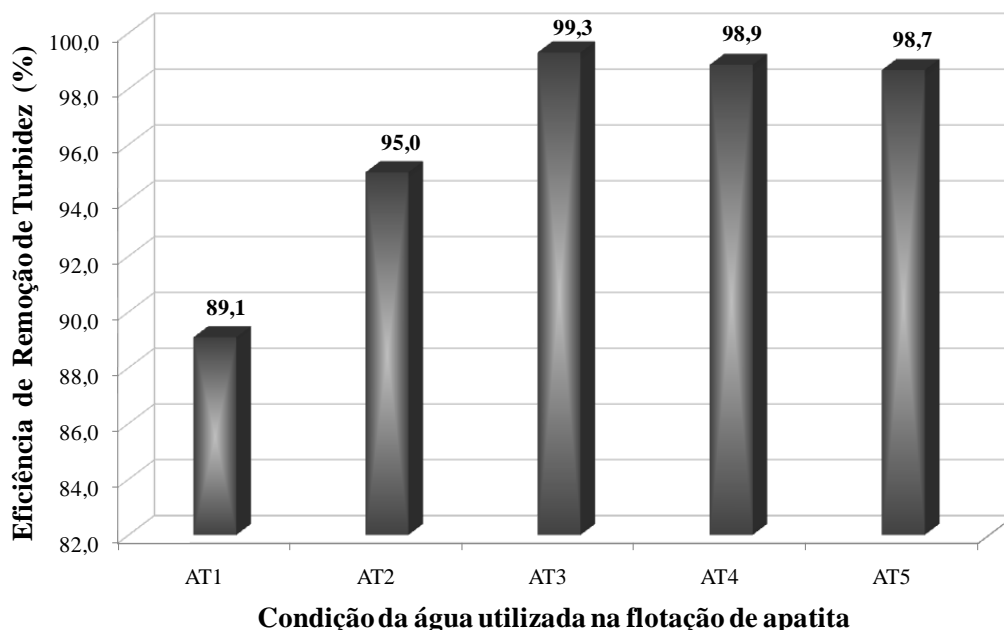


Figura 4. Eficiência de remoção de turbidez nos efluentes tratados por FAD.

Os valores obtidos para o teor de  $P_2O_5$  para os experimentos de flotação utilizando o efluente tratado não se mostraram tão expressivos quanto aqueles obtidos para recuperação. Isto pode estar relacionado à quantidade de coagulante usado na etapa de pré-tratamento, podendo o coagulante residual no efluente tratado afetar a etapa de condicionamento do processo, e consequentemente, a qualidade do concentrado apatítico.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que o desempenho da flotação de apatita é fortemente afetado pela qualidade da água utilizada, uma vez que a recuperação caiu de 63,6 para 39,5%, resultando numa redução de aproximadamente 38%. O tratamento da água de processo por FAD mostrou-se satisfatório, visto que a produção do processo (recuperação de apatita) foi restaurada, apontando valores acima de 60%. A remoção de material particulado suspenso do efluente atingiu níveis excelentes, alcançando 99,3% de eficiência de remoção de turbidez. Diante disto, o sistema coagulação-floculação-FAD torna-se uma alternativa promissora para melhorar a qualidade da água, seja para descarte ou para reaproveitamento na etapa de concentração do minério fosfático de Araxá - MG. Os resultados apresentados realçam a importância de uma etapa de tratamento de água nas usinas de processamento mineral.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Evento Científico ou Tecnológico (PCE-00019-13), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, à Vale Fertilizantes pelo fornecimento de matéria-prima.

## 6. REFERÊNCIAS

GUIMARÃES, R. C.; PERES, A. E. C. Interfering ions in the flotation of a phosphate ore in a batch column. *Minerals Engineering*, v.12, n. 7, p. 757-768, 1999.

NUNES, D.G.; FRANÇA, S.C.A.; COUTO, H.J.B. Estudo da distribuição de tamanho de bolhas do processo de flotação por ar dissolvido visando à recuperação de finos da indústria mineral. In: *Anais da XV Jornada de Iniciação Científica, CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2007.*

OLIVEIRA, A.P.A; LUZ, A.B. da. Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração, *Série Tecnologia Ambiental*, 24, CETEM/MCT, 2001.

RODRIGUES, R.T.; RUBIO, J. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, v.82, p. 1-13, 2007.

RODRIGUES, R.T.; RUBIO, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. *Minerals Engineering*, v.16, p. 757-765, 2003.

RUBIO, J; SOUZA, M.L.; SMITH, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, v.15, p. 139-155, 2002.

SANTOS, M.A.; SANTANA, R.C.; CAPPONI, F.; SANTOS, T.C.M., ATAÍDE, C.H.; BARROZO, M.A.S. Processo de flotação por ar dissolvido no tratamento de água proveniente da indústria de fertilizante. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, p. 2454, Búzios, Brasil, 2012a.

SANTOS, M.A.; SANTANA, R.C.; CAPPONI, F.; ATAÍDE, C.H.; BARROZO, M.A.S. Influence of the water composition on the selectivity of apatite flotation. *Separation Science and Technology*, v.47:4, p. 606-612, 2012b.

SANTOS, M.A.; SANTANA, R.C.; CAPPONI, F.; ATAÍDE, C.H.; BARROZO, M.A.S. Effect of ionic species on the performance of apatite flotation. *Separation and Purification Technology*, v.76, p. 15-20, 2010.

SIS, H.; CHANDER, S. Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review. *Minerals Engineering*, v.16, p. 577-585, 2003.

ZOUBOULIS, A.I; AVRANAS, A. Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v.172, p. 153-161, 2000.