
PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO POR MEIO DE FLOTAÇÃO EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES

PROCESS OF BENEFITING IRON ORE TAILINGS BY FLOTATION IN DIFFERENT CONCENTRATIONS

Samuel de Oliveira Freitas ¹

Igor Brumano Coelho Amaral ²

Arlete Barbosa dos Reis ³

Resumo: A Usina Hidrelétrica de Risoleta Neves (Candonga) recebeu grande quantidade do rejeito da barragem do Fundão em Bento Rodrigues, distrito de Mariana-MG, onde operava a mineradora Samarco. O presente trabalho teve por objetivo estudar o beneficiamento desses rejeitos a partir do processo de flotação reversa de minério de ferro em três diferentes concentrações de sólido, 25, 37,5 e 50% em massa. Esse processo consiste na separação de minérios, nesse caso, a separação de sílica e de ferro. Com a concentração de melhor rendimento foram feitas duas análises com as porções flotada e não flotada: granulométrica e difração por raios-X, para confirmar a eficiência do processo para esse rejeito. Nos resultados o flotado apresentou 88% composto por quartzo o não flotado apresentou, em comparação com o flotado, maior concentração de ferro. A caulinita e a goethita apresentaram os melhores resultados do material analisado. Dessa forma, conclui-se que o processo de flotação foi eficiente para a separação dos minerais em questão, de modo a possibilitar a ampliação de estudos direcionados a convertê-los em produtos de valor agregado.

Palavras-chaves: Beneficiamento, DRX, Granulometria, Processo de separação, Rejeito de mineração.

Abstract: *Risoleta Neves Hydroelectric Power Plant (Candonga) received a large amount of tailings from the Fundão dam in Bento Rodrigues, Mariana-MG district, where the mining company Samarco operated. The present work aimed to study the beneficiation of these tailings from the process of Reverse flotation of iron ore in three different concentrations, 25, 37.5 and 50% by mass. This process comprises separation of ores, in this case, separation of silica and iron. With the best yield concentration, we performed two analyzes with the floated and non-floated portions: particle size and X-ray diffraction, to confirm the process efficiency for this tailing. In the results, the floated showed 88% composed of quartz, the non-floated one presented, in comparison with the floated one, a higher iron concentration. The kaolinite and goethite presented the best results of the analyzed material. Therefore, we can concluded that the flotation process was efficient for separation of minerals in question, allowing expansion of studies aimed at converting them into value-added products.*

Keywords: Processing, XRD, Granulometry, Separation Process, Mining Tailings.

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK – Brasil, e-mail: samuel.freitas37@hotmail.com

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK – Brasil, e-mail: igorbrumano@gmail.com

³ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus JK – Brasil, e-mail: arlete.reis@ict.ufvjm.edu.br

1 Introdução

A atividade mineradora causa grande impacto no meio ambiente. Há grande mudança nas paisagens, variação dos aspectos gerais da qualidade de água, solo e ar, o que, a depender dos resíduos gerados, pode comprometer a saúde dos trabalhadores e das pessoas das áreas de entorno da atividade de exploração (JUNIOR; SOUZA; ELERES, 2016, MATOS, 2010). Em contrapartida, a demanda por recursos minerais tem aumentado nos últimos anos devido ao rápido crescimento populacional e ao aumento do volume de exportações. Esses materiais não são renováveis, por isso, muitas jazidas de alta concentração de minério já estão em sua capacidade máxima de extração, incentivando a busca por outras formas de tratamento mineral mais complexas e com exploração de baixos teores (PENNA *et al.*, 2003, MACKAY *et al.*, 2018).

Dentro desse contexto, o ferro representa 6% da composição da crosta terrestre, sendo extraído principalmente dos minerais magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3) como fonte de ferro primário, que por sua vez são utilizados basicamente para produção de aço (VELOSO *et al.*, 2018). Esse elemento é considerado normalmente a segunda maior commodity do mundo, atrás apenas do petróleo bruto. Mas, devido ao crescimento populacional e a urbanização, a utilização desse material vem aumentando consideravelmente nos últimos anos (VELOSO *et al.*, 2018).

Com o avanço das tecnologias, as indústrias de mineração estão sujeitas a produzir materiais mais específicos, com maior pureza e com menores custos. Neste sentido, a operação unitária, denominada flotação, é um processo de concentração mineral desenvolvido para recuperar os minérios de menores teores perdidos na extração do mineral de maior teor (PENNA *et al.*, 2003).

A flotação é um processo de separação físico-química realizada por meio das diferenças de características superficiais das substâncias presentes na mistura heterogênea, formada por partículas em suspensão, fase aquosa (polpa) e pela fase gasosa formada pelo gás introduzido no sistema (SAID *et al.*, 2019, LI; WANG, 2017).

Segundo Lopes (2009), a flotação, especialmente no beneficiamento do minério de ferro, possui dois métodos diferentes para sua realização: a forma direta, na qual o óxido de ferro é flotado utilizando-se reagentes aniônicos e a forma reversa, onde o amido de milho é o mais utilizado como depressor para os minérios de ferro enquanto, os minerais de silicato são flotados usando usualmente amina como coletora (VELOSO *et al.*, 2018, ROCHA *et al.*, 2019).

Algumas propriedades das partículas da amostra e partes do equipamento utilizado podem interferir na eficácia do processo, como a hidrofobicidade e hidrofiliabilidade, relacionadas à afinidade com a água, tamanho dos grãos que compõem a amostra tendo uma faixa estreita de tamanho de partícula ($< 45\mu\text{m}$ - $200\mu\text{m}$), pH, reagentes, agitação e aeração (LIMA, 2010, SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007, WANG; WANG, 2018). Esse método de separação é considerado simples e flexível e sua operação é eficiente, pois gera pequenas quantidades concentradas de lama, podendo ser usado de pequena à larga escala (SCHOENHALS, 2006; PIUZZANA *et al.*, 2015).

O rejeito de mineração utilizado neste estudo é proveniente da lama de rejeito lançada no rio Doce pelo rompimento da barragem do Fundão, em Bento Rodrigues, distrito de Mariana-MG, em 5 de novembro de 2015 (FUNDAÇÃO RENOVA, 2018).

Dessa forma, este trabalho se justifica pela recuperação dos minerais presentes no rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG, buscando alternativas que auxiliassem na diminuição do volume de rejeito retido na hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga). Para tanto, como objetivo principal, optou-se por

estudar a aplicação do processo de flotação reversa como forma de recuperação de minério, avaliando a concentração de polpa na qual o rendimento seria maior. Além de analisar a eficácia do processo de flotação a partir da caracterização da porção flotada e não flotada.

2 Materiais e Métodos

O equipamento utilizado para a flotação foi um flotador de bancada em escala laboratorial da fabricante UpControl, com capacidade para flotar 1 L de polpa. As amostras analisadas são oriundas do rejeito da barragem do Fundão localizado no distrito de Mariana-MG (Bento Rodrigues), coletados na hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga) em Santa Cruz do Escalvado-MG. A realização do processo de flotação da polpa com 50% de sólidos é apresentada na Figura 1.



Figura 1. Flotação do rejeito.

O processo utilizado foi a flotação catiônica reversa. Com adição de hidróxido de sódio para ajuste de pH a 10,5, utilização de amido de milho comercial como depressor e amina EDA (etileno dietilamina) como coletora. A velocidade de rotação foi de 1500 rpm e, para aeração do sistema, foi utilizado um compressor com uma vazão de ar comprimido de 200 NL/h (litro de ar normal por hora) (Figura 2).

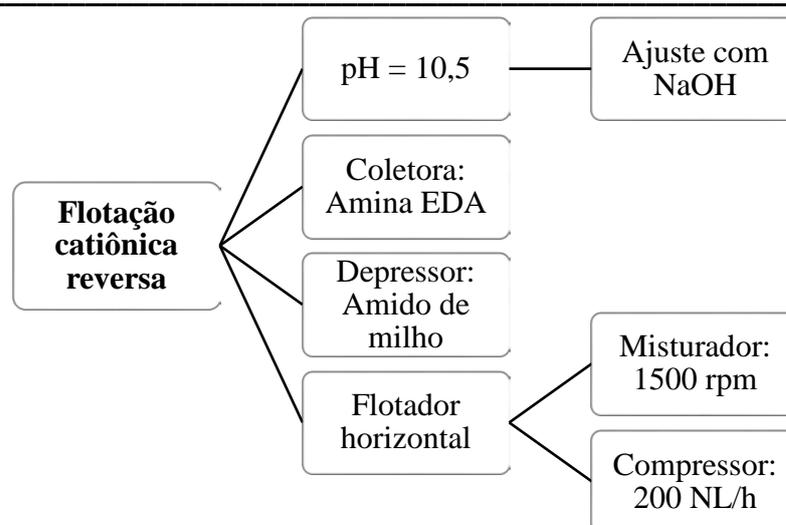


Figura 2. Diagrama do processo de flotação utilizado.

No processo de flotação reversa foram utilizados dois reagentes:

amido de milho como depressor e amina EDA como reagente coletor, despejados no flotador horizontal para a realização do experimento. Utilizaram-se hidróxido de sódio (NaOH) e água destilada para solubilização do amido misturados com auxílio de bastão de vidro até completa gelatinização. Na preparação da amina utilizou-se apenas água destilada para homogeneização. Os dois reagentes foram armazenados em balões volumétricos para serem posteriormente empregados no processo de flotação reversa.

Na preparação do amido (depressor) foi mantida a proporção de um grama de amido para 2 mL de água e 5 mL de solução de NaOH 5% (peso/volume), agitando com bastão de vidro até adquirir aspecto gelatinizado e transparente. Na preparação da amina EDA (coletor) a 5% p/v, misturou-se 25 g de amina EDA a água destilada para a homogeneização da solução. O processo da flotação foi realizado em três concentrações diferentes a 25, 37,5 e 50% (título em massa) de resíduos sólidos na polpa, sendo a concentração de 50% o valor mais próximo indicado na literatura de referência, 25% por ser uma baixa concentração e 37,5% como valor mediano. Em cada concentração o pH da polpa foi corrigido para 10,5 com hidróxido de sódio ou ácido clorídrico, pH indicado para flotação reversa de minério de ferro (PIUZZANA *et al.*, 2015), como observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade em massa (g) e volume (mL) dos reagentes e soluções utilizados para as três concentrações.

Concentrações	Depressor (amido, g)	Coletor (amina, g)	Depressor (amido, mL)	Coletor (amina, mL)
25,0%	0,025	0,050	2,50	1,00
37,5%	0,047	0,094	4,70	1,88
50,0%	0,100	0,200	10,00	4,00

Fonte: Autoria própria.

A polpa foi transferida para o flotador e deixada em repouso por 5 minutos. Após descanso foi ligado o rotor a uma velocidade de 1500 rpm e, para aeração do sistema, foi utilizado um compressor com uma vazão de ar comprimido de 200 NL/h. Adicionou-se o amido gelatinizado e manteve-se a polpa em agitação por 5 minutos. Logo após, adicionou-se à polpa a amina EDA e os demais reagentes de acordo com a concentração de cada experimento. A coleta do concentrado foi feita manualmente com auxílio de espátulas de aço

inoxidável e depositados em béqueres até o término do experimento, sendo posteriormente seco e pesado para que fosse feito o cálculo do rendimento do processo.

O rendimento gerado nas três diferentes concentrações de lama foi definindo por meio de análise granulométrica utilizada para determinar o tamanho das partículas presentes nas amostras e, com isso, mostrar qual percentual de fração de argila, silte e areia (OLIVEIRA JR; MEDEIROS, 2008). Para a realização do ensaio, foi disperso cerca de 5 g de material em 50 mL de água e a leitura foi realizada em 60 s, em ultrassom com função dispersante para as partículas, analisado no granulômetro à laser, modelo Cilas 1190.

A difração de raios-X é um método muito utilizado em muitas áreas da ciência como na geologia, indústria química, indústria metalúrgica, física de estados sólidos e pesquisa de materiais, entre outros. Nessa técnica é possível identificar nas amostras as estruturas cristalinas, fases de cristalização, misturas de materiais entre outras aplicações, a partir de comparação com difratogramas padrões conhecidos (ALEXANDRE, 2000). O ensaio de DRX desse estudo foi efetuado em um difratômetro de raios-X automático, marca Rigaku, modelo D/MAX, gerador de raios-X de 3kW, velocidade de varredura do goniômetro de 4,00°/min, com faixa de 0 a 80°.

3 Resultados e discussões

Após a secagem, as porções de rejeito flutuado e não flutuado apresentaram características específicas, a começar pela coloração, como pode ser visto na Figura 3, na qual apresentam-se as variações de cor do rejeito puro do flutuado, que apresenta coloração mais clara, indicando a presença maior de sílica e menor de ferro e do não flutuado, que possui coloração mais escura, apontando a maior presença de minerais de ferro e menor presença de sílica.



Figura 3. Amostras do rejeito (a) Puro; (b) Flotado e (c) Não flotado para a polpa com concentração de 50%.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados do processo de flotação reversa para as concentrações de polpa de 25, 37,5 e 50% sob a forma de massa inicial de sólido e as massas das porções flutuada e não flutuada após a secagem, e o rendimento do processo para cada uma das concentrações (flotabilidade).

Tabela 2 -Dados obtidos pelo processo de flotação nas três concentrações.

	Peso total (g)	Peso inicial do sólido (g)	Flotado (g)	Não flotado (g)	Flotabilidade (Rendimento)
25,0%	500,00	125,00	42,24	82,76	33,80%
37,5%	626,67	235,00	97,80	137,20	41,61%
50,0%	1000,00	500,00	245,83	254,17	49,17%

Fonte: Autoria própria.

Como se observa na Tabela 2, o rendimento maior foi obtido na realização da flotação com concentração de 50% de sólido. O resultado justifica o uso da concentração de 45% de sólido na indústria para o processo de flotação reversa de minério de ferro, valor

próximo do obtido neste trabalho (LOPES, 2009). Dessa forma, foram realizadas as análises granulométricas e de DRX do material oriundo da flotação com concentração de 50% de sólido. Na Figura 4 observam-se as curvas granulométricas das porções de rejeito flotada, não flotada assim como do rejeito puro. Na Tabela 3, observam-se as porções de argila, silte e areia.

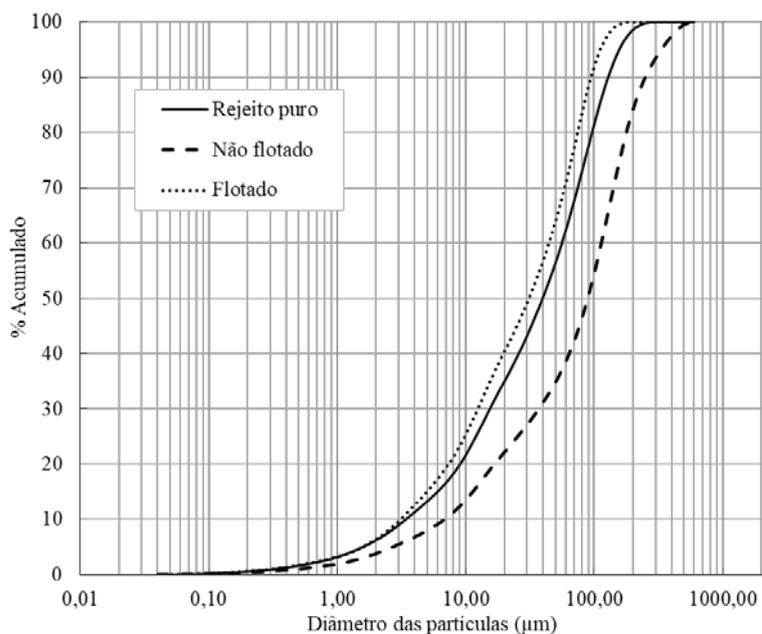


Figura 4. Curva Granulométrica do rejeito puro e das porções de rejeito flotado e não flotado (concentração de 50%).

Tabela 3 - Quantidade de fração granulométrica no rejeito puro e no material de 50% de sólido.

	Argila (<2 µm)	Silte (2 a 60 µm)	Areia (60 a 2000 µm)
Rejeito Puro	6,20%	53,70%	40,10%
Flotado	6,40%	61,90%	31,70%
Não Flotado	3,80%	33,50%	62,80%

Fonte: Autoria própria.

Com a análise da Tabela 3 foi possível perceber que o flotado concentrou mais silte e argila, já que os argilominerais silicatados possuem menor granulometria, e o não flotado demonstrou maior concentração de areia, pois a partir de 300 µm o processo não é eficiente logo essas partículas maiores ficam retidas no fundo do sistema (não flotado) (LIMA, 2010). A partir dessa análise observa-se que a granulometria do rejeito puro é composta por frações mais finas, com destaque para o silte, compondo mais de 50% do material.

O resultado das análises mineralógicas é demonstrado abaixo nas Figuras 5, 6 e 7 por meio dos difratogramas para as porções do rejeito puro, do não flotado e do flotado.

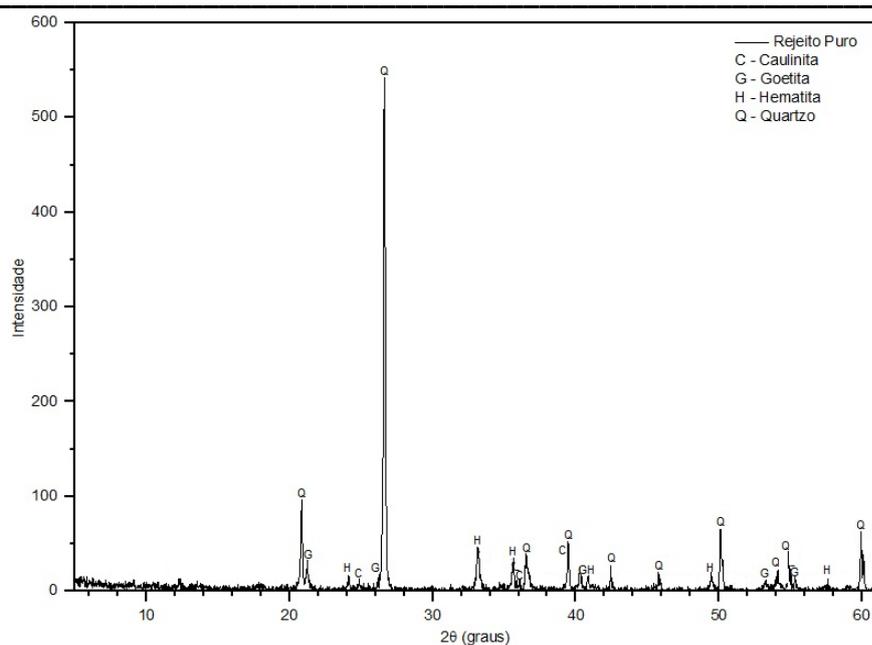


Figura 5. Difratoograma de raios-X do rejeito puro.

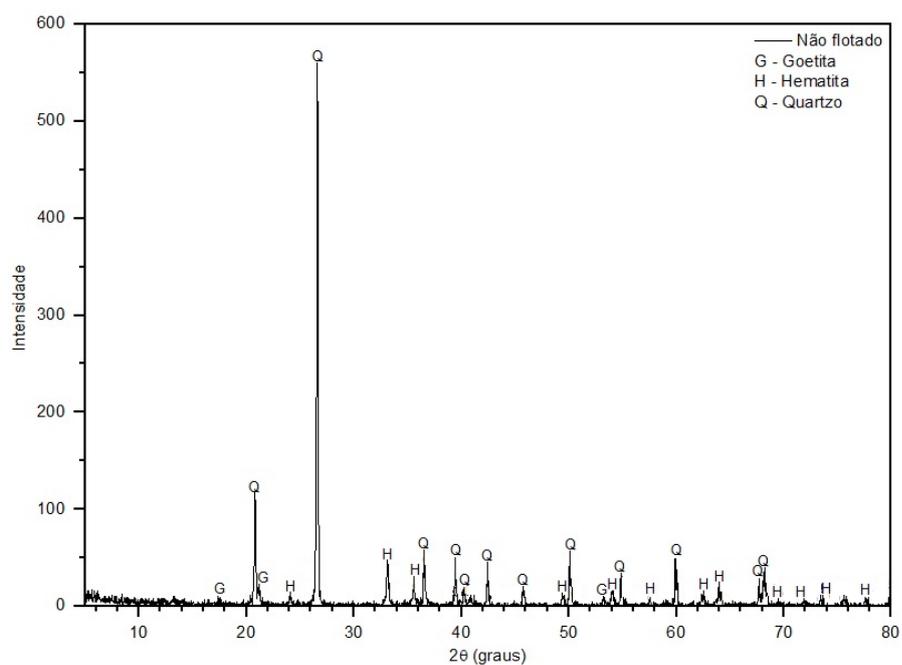


Figura 6. Difratoograma de raios-X do rejeito não flotado.

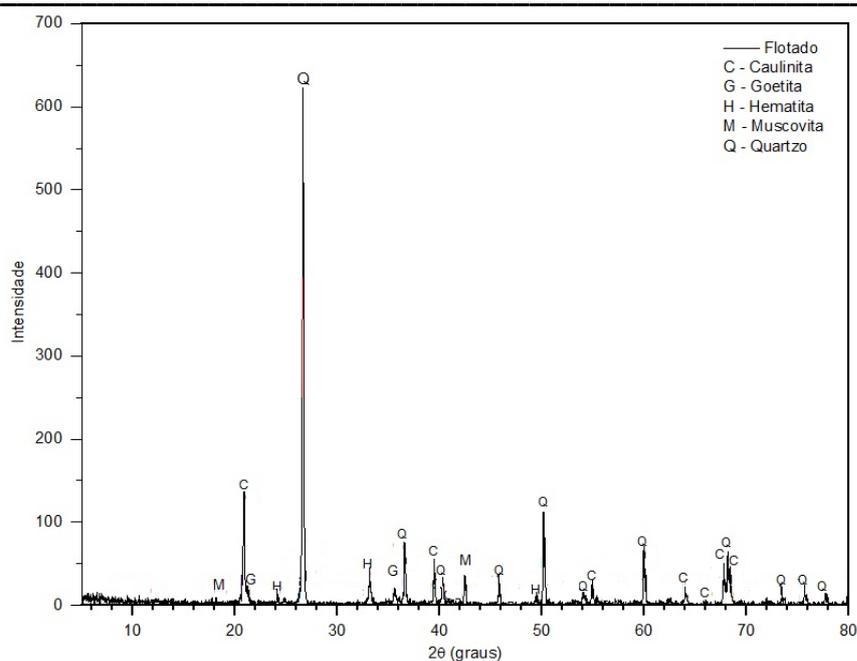


Figura 7. Difratograma de raios-X do rejeito flotado.

Os difratogramas mostraram que o rejeito de Candonga possui grande quantidade de quartzo e boa concentração de minerais de ferro, entre outros. Essa análise confirmou a separação dos minerais de ferro, haja vista que o flotado é, aproximadamente, 88% composto por quartzo e o não flotado apresentou, em comparação com o flotado, maior concentração de ferro, mas não é possível afirmar sua total eficiência em razão de seu alto teor de sílica e baixo teor de ferro. Nota-se que, em relação à goethita, a porção não flotada apresentou quase 11% desse minério enquanto o flotado apresentou menos que 4% essa diferença pode indicar que o amido como agente depressor reage melhor na goethita do que na hematita.

Com relação à caulinita, pode-se observar que o processo concentrou toda a massa desse argilomineral na porção flotada, indicando a eficácia da flotação catiônica reversa para esse mineral.

4 Conclusões

A melhor concentração para o processo foi o de 50% m/m, e as análises granulométrica e de DRX demonstraram que o processo de flotação catiônica reversa contribuiu para melhorar a separação da sílica do ferro, sobretudo com relação à goethita e à caulinita. Portanto, novas pesquisas devem ser realizadas buscando tanto o desenvolvimento de compostos a serem utilizados como depressores e coletores quanto melhorias nos métodos de flotação, seja direta ou reversa, além de contribuir para a diminuição da quantidade de rejeito destinando-os a bens de valor agregado de acordo com os minerais em teor mais elevado em cada porção.

O volume de reagentes utilizados no processo (amido e amina EDA) não alteram significativamente os impactos ambientais gerados com o possível descarte de alguma porção da flotação, uma vez que a relação entre a massa de reagente e a massa de rejeito é da ordem de 10^{-4} .

De modo geral, o uso da flotação reversa auxiliou na melhoria da concentração do mineral de interesse e, conseqüentemente, a eficácia do processo de separação como um todo.

Portanto, haja vista o reaproveitamento dos rejeitos descartados pelas minerações de diferentes tipos minerais torna-se possível o desenvolvimento de bens materiais e reutilização destes na metalurgia, resultando em diminuição significativa do volume de rejeito em barragens nas indústrias de mineração.

Agradecimentos (Opcional)

Os autores agradecem: à FAPEMIG-Projeto “Rede Candongas”- APQ-03624-17; ao Laboratório de Difração de Raios X / Serviço de Tecnologia Mineral – SETEM do CDTN, ao Laboratório de Combustível Nuclear (LABCON) do CDTN, ao Laboratório de Engenharia 1 da UFVJM e ao GEPAEQ-Grupo de Estudos e Pesquisa Aplicada à Engenharia Química/UFVJM.

Referências

ALEXANDRE, J. **Análise de matéria-prima e composições de massa utilizada em cerâmicas vermelhas**. 200. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências de Engenharia com ênfase em Geotecnia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2000.

FUNDAÇÃO RENOVA 2018. **Manejo de rejeitos**. Disponível em: <http://www.fundacaorenova.org/manejo-de-rejeitos>. Acesso em: 13/07/2018.

JUNIOR, A. P.; DE SOUZA, M. N. O.; ELERES, T. C. S. Valoração Dos Impactos Ambientais Na Exploração Mineral Do Ferro: O Caso De Uma Mineradora Em Floresta Do Araguaia–Pa. **Revista Engenharia Ambiental-Espírito Santo do Pinhal**, v. 13, n. 2, p. 128-138, 2016.

LI, C.; WANG, L. Improved froth zone and collection zone recoveries of fine mineral particles in a flotation column with oscillatory air supply, **Separation and Purification Technology** (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.054>, 2017.

LIMA, N. P **Avaliação do processo de flotação para diferentes frações granulométricas**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2010.

LOPES, G. M. **Flotação direta de minério de ferro**. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

MACKAY, I.; MENDEZ, E.; MOLINA, I.; VIDELA, A.R.; CILLIERS, J.J.; BRITO-PARADA, P.R. Dynamic froth stability of copper flotation tailings. **Minerals Engineering** 124 (2018) 103–107. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.005>, 2018.

MATOS, A.T. **Poluição ambiental: Impactos no meio físico**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2010. 260p.

OLIVEIRA JR, J. G; MEDEIROS, W. E. Influência do conteúdo de água, granulometria e minerais pesados sobre as reflexões de GPR em corpos arenosos inconsolidados. **Rev. Bras. Geof.** 2008, vol.26, n.4, p.437-449.

PENNA, R; OLIVEIRA, M. L. M.; VALADAO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Estudo comparativo entre dois sistemas de aeração de coluna de flotação. **Revista Escola de Minas**. 2003, vol.56, n.3, p.195-200.

PIUZZANA, G; MACHADO, H; ETRUSCO, I; BIGÃO, L; LÉLIS, M; DINALLI, R **Flotação**. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual de Minas Gerais, João Monlevade-MG, 2015.

ROCHA, G. M; MACHADO, N.R. S.; SANTOS, B. T.; CLERICI, M. T. P. S; PEREIRA, C. A. Caracterização tecnológica e avaliação de depressores na flotação de rejeito de minério de ferro. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191637>, 2019.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais/Ed.** João Alves Sampaio, Silvia Cristina Alves França, Paulo Fernando Almeida Braga. – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, p. 237-238.

SAID, A. B.; FRANCES, F.; GRANDJEAN, A.; LATRILLE, C.; FAURE, S. Study of a foam flotation process assisted by cationic surfactant for the separation of soil clay particles: processing parameters and scaling-up sensitivity, **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107547>, 2019.

SCHOENHALS, M. **Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006.

VELOSO, C.H.; FILIPPOV, L.O.; FILIPPOVA, I.V.; OUVARD, S.; ARAUJO, A.C. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores. **Minerals Engineering** 125 (2018) 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.031>, 2018.

WANG, J.; WANG, L. Improving column flotation of oxidized or ultrafine coal particles by changing the flow pattern of air supply. **Minerals Engineering** 124 (2018) 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.018>, 2018.