



DESEMPENHO DE UMA MISTURA DE ÓLEOS DE MACAÚBA E PINHÃO MANSO ATUANDO COMO COLETORES NA MICROFLOTAÇÃO DE APATITA

AMORIM, A.L.S.¹, SILVA, A.C.¹, SILVA, E.M.S.¹,
LIMA, R.V.O.¹, MATA, C.E.D.¹

¹Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Goiás (UFG). E-mail: analuiza.sampaio12@gmail.com

RESUMO

A fim de se desenvolver coletores naturais, não poluentes e de baixo custo para o processo de flotação, foram realizados testes de microflotação em tubo de Hallimond utilizando cristais de apatita purificada, empregando-se uma mistura de óleos de macaúba (OPMAC) e pinhão manso (OPIM) como coletores. Os testes ocorreram em pH 8 a uma concentração fixa de coletor de 2,5 mg/L. Os óleos foram misturados em cinco proporções diferentes (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, e 100:0). A mistura de ácidos graxos sintéticos chamado Flotigam 5806, da Clariant, um coletor adotado industrialmente, foi usado como referência. O OPMAC puro, mais enriquecido em ácido oleico, promoveu uma flotabilidade de apatita (aproximadamente 92%) bem superior ao OPIM puro. Todavia, como o OPIM tem um preço de venda bem inferior ao OPMAC, a mistura resultante dos dois óleos em uma proporção de 90:10 (OPMAC:OPIM) impactou na redução do custo final do coletor (8% menor que o OPMAC e 44% menor que o Flotigam 5806) ao mesmo tempo em que manteve a flotabilidade da apatita em patamares próximos ao Flotigam 5806 e o OPMAC puro.

PALAVRAS-CHAVE: Microflotação; Ácidos graxos naturais; Macaúba; Pinhão manso; Apatita.

ABSTRACT

In order to develop natural, non-polluting and low cost reagents in froth flotation process, microflotation tests in Hallimond tube were carried out with high purity apatite crystals using a mixture of a Macauba (OPMAC) and *Jatropha curcas* (OPIM) oils. The tests were carried out at pH 8, using a collector dosage of 2.5 mg/L. The oils were mixed at five different ratios (0:100, 25:75, 50:50, 75:25, and 100:0). The synthetic fatty acid mix called Flotigam 5806, from Clariant, an industrially adopted collector was used as benchmark. OPMAC, which is the richest in oleic acid, promoted the highest apatite floatability (almost 92%), quite superior to OPIM. However, since the OPIM has a lower cost than OPMAC, the resulting mixture of the two oils in a ratio of 90:10 (OPMAC: OPIM) promoted the reduction of collector final cost (8% lower than OPMAC and 44 % lower than the Flotigam 5806) while maintaining the floatability of the apatite similar to Flotigam 5806 and pure OPMAC.

KEYWORDS: Microflotation; Natural fatty acids; Macauba; *Jatropha curcas*; Apatite.

1. INTRODUÇÃO

Os depósitos de fosfato mundiais são classificados em sedimentares, ígneos e biogênicos. A maior parte das reservas brasileiras (cerca de 80%) é de origem ígnea. Os minerais de minério portadores de fósforo pertencem ao grupamento da apatita ($\text{Ca}_5(\text{Cl, F, OH})(\text{PO}_4)_3$) e para a confecção de fertilizantes, se faz necessário a obtenção de um concentrado fosfático enriquecido em P_2O_5 e, para tal, utilizam-se processos de beneficiamento, sendo a flotação uma etapa crucial (SOUZA, FONSECA, 2008).

A flotação é um processo de concentração que se baseia nas características de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade das partículas. Os reagentes de flotação, categorizados como coletores, têm como propósito hidrofobizar a superfície das partículas do mineral de interesse ou minerais de ganga, afim de possibilitar a aderência dos mesmos as bolhas de ar e sua recuperação na espuma (BALTAR, 2008). Os coletores mais utilizados na flotação aniônica direta de apatita são os sais de ácidos graxos, sendo os óleos vegetais as fontes mais utilizadas para obtenção desses compostos.

Um dos problemas encontrados durante a flotação do fosfato é a reduzida seletividade dos coletores, devido à presença de cátions semelhantes na estrutura cristalina da apatita e os carbonatos comumente encontrados na ganga, influenciando na eficiência das plantas de beneficiamento (ALBUQUERQUE, 2010).

Os óleos vegetais são alvos recorrentes de pesquisas que buscam investigar suas potencialidades como coletores, buscando reagentes alternativos que ofereçam maior seletividade na flotação. Frutos e vegetais da flora brasileira já foram objetos de pesquisa, como no caso de óleos vegetais de frutos típicos da floresta amazônica analisados por Costa (2012), que obteve resultados satisfatórios nos produtos da flotação de fosfatos.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira típica de regiões de clima tropical da América Latina, e suas utilidades mais comuns são como fármacos, madeireiro, artesanato, insumo da indústria alimentícia e na produção de biocombustíveis. Os coprodutos resultantes da extração do óleo podem ser empregados na composição de ração para animais e na fabricação de carvão vegetal (REMAPE, 2014). Já o pinhão manso (*Jatropha Curcas L.*) é uma planta arbustiva e oleaginosa, possui resistência a variações climáticas e é adaptável a solos com diferentes características (SILVA *et al.*, 2018). Segundo Rosado *et al.* (2010) o cultivo do pinhão manso no Brasil teve, a princípio, a intenção de ser utilizado como cerca viva e para a fabricação de óleo em pequena escala.

Com a caracterização de óleos extraídos da macaúba realizada por Fortes e Baugh (1999), Zuppa (2001) e Ciconini (2012) e a do pinhão manso feita por Silva *et al.* (2018), foi possível realizar uma comparação entre suas composições lipídicas, como apresentado na tabela 1. A presença de ácidos graxos insaturados, que são mais solúveis em água, está intimamente relacionada com a eficiência da flotação.

Pachêto *et al.* (2014) comprovaram a aplicabilidade e eficácia do óleo da polpa de macaúba como coletor de apatita, assim como Silva *et al.* (2018) atestaram a efetividade, neste caso, do óleo de pinhão manso para tal fim. Com o propósito de se desenvolver coletores naturais, não poluentes e de custo acessível na flotação, essa pesquisa visou avaliar a eficiência de uma mistura dos óleos de polpa de macaúba (OPMAC) e pinhão manso (OPIM) puros, e em misturas com diferentes proporções, atuando como reagentes coletores na flotação direta de apatita. O desempenho da mistura foi avaliado em termos da

flotabilidade da apatita e custos de reagentes em comparação ao OPMAC e OPIM puros, além de uma mistura de ácidos graxos sintéticos fornecido pela Clariant (Flotigam 5806), um coletor adotado industrialmente.

Tabela 1. Proporção em % de ácidos graxos nos óleos de polpa de macaúba e pinhão manso.

Composição ácidos graxos	Polpa de macaúba			Pinhão manso
	Fortes & Baugh (1999)	Zuppa (2001)	Ciconini (2012)	Silva <i>et al.</i> (2018)
Caprílico (C8)	0,8	0,45	-	-
Cáprico (C10)	0,5	0,27	-	-
Láurico (C12)	3,8	1,97	2,93	-
Mirístico (C14)	1,1	0,45	1,88	-
Palmítico (C16)	19,7	15,96	22,3	19,6
Esteárico (C18)	2	5,92	5,75	9,6
Araquídico (C20)	0,2	0,5	-	0,3
Gadoleico (C20:1)	0,1	-	-	-
Palmitoleico (C16:1)	2,8	1,01	5,28	2,4
Oleico (C18:1)	58,7	65,87	58,82	33,96
Linoleico (C18:2)	7,3	5,1	4,69	42,88
Vacênico (C18:2)	1,9	-	-	-
Linoléico (C18:3)	1,1	2,52	-	-

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de apatita empregada neste trabalho de pesquisa foi obtida na sua forma natural de uma companhia de mineração. A metodologia para obtenção, preparação e caracterização tecnológica da apatita utilizada nos ensaios de microflotação está descrita no trabalho de Silva *et al.* (2019) atingindo uma faixa granulométrica de -180 a +150 μ m. O coletor utilizado consistiu em uma mistura de óleo de macaúba e pinhão manso saponificados a frio. As proporções da mistura, em peso dos óleos de macaúba/pinhão manso, foram respectivamente de: 0/100; 25/75; 50/50; 75/25 e 100/0%.

O óleo da polpa da Macaúba (OPMAC) foi adquirido com os produtores rurais da Unidade Beneficiamento de Coco Macaúba (UBCM) pela Associação Riacho D'antas Macaúba, sediada em Montes Claros/MG e o óleo de Pinhão Manso foi doado pela Embrapa unidade Brasília/DF.

O método de mistura foi realizado com os óleos em sua forma natural, mantendo a proporção em peso. Antes de iniciar a flotação no tubo de Hallimond fez-se necessário a operação de saponificação a fim de torná-los solúveis em água e assim atuarem efetivamente como coletores. O processo de saponificação a frio (temperatura ambiente) iniciou-se com a adição de 5,0g do coletor, 20mL de água destilada e 7,5mL de solução de NaOH a 10% (p/v) em um béquer de 250mL. A conversão dos óleos em sais de ácidos graxos ocorreu sob agitação promovida por agitador magnético durante 5 minutos. Após esse período retornou-se o béquer à balança e adicionou-se água destilada até atingir 100g. O conjunto foi submetido novamente a agitação durante 10 minutos para homogeneizar a solução. O coletor sintético Flotigam 5806, produzido pela Clariant, foi saponificado seguindo o mesmo procedimento.

Os ensaios foram executados em um tubo de Hallimond modificado com volume total de 320mL. Os testes de microflotação ocorreram conforme as condições descritas na tabela 2, empregando-se 1,0g do mineral e 2,5mg/L do coletor durante 7 minutos. Todos os ensaios foram realizados em pH 8. A vazão de ar empregada foi de 40cm³/min e pressão 10psi de forma a evitar o arraste hidráulico. Após essa etapa, os materiais flotado e afundado foram filtrados a vácuo e secos em estufa. A recuperação mássica da apatita foi obtida a partir da razão entre a massa flotada e a massa total de material alimentado nos testes.

Tabela 2. Condicionantes operacionais dos ensaios de microflotação.

Condições de ensaio	
Vazão de ar (cm ³ /min)	40
pH	8,0
Pressão (psi)	10
Faixa Granulométrica (µm)	-180+150
Massa do mineral (g)	1,0
Tempo de condicionamento (min)	7
Tempo de flotação (min)	1
Concentração do coletor (mg/L)	2,5
Volume total (mL)	320

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais de flotabilidade da apatita empregando a mistura dos óleos naturais em estudo como coletor, em diferentes proporções são apresentados na Figura 1. Os pontos em vermelho indicam a flotabilidade média da apatita e as barras verticais representam o desvio padrão das triplicatas. A flotabilidade média da apatita utilizando o Flotigam 5806 na concentração de 2,5 mg/L é apresentada como uma linha horizontal tracejada em preto. Uma regressão linear foi utilizada para modelar os pontos experimentais e é apresentada como uma linha vermelha.

Quando comparado com o Flotigam 5806, o teste com 100% do OPMAC forneceu melhor recuperação (aproximadamente 92%) que as outras proporções da mistura de óleos utilizados. Testes de microflotação em tubo de Hallimond com apatita pura conduzidos por Brandão *et al.* (1994) demonstraram que os ácidos graxos insaturados (linoleico, oleico e linolênico) tiveram desempenho muito superior em relação aos saturados. O óleo da polpa de macaúba, que é o mais enriquecido em ácido oleico (58,7 a 65,7%) em comparação ao óleo de pinhão manso (33,96%), promoveu a maior flotabilidade de apatita (aproximadamente 92%). Entretanto, o OPIM puro apresentou um desempenho bem inferior ao do OPMAC em termos de flotabilidade da apatita (19,4%), ou seja, o efeito sinérgico produzido pelo aumento da proporção de OPIM na mistura de óleos foi desfavorável à hidrofobização da superfície da apatita. Uma explicação possível estaria relacionada ao seu menor teor de ácido oleico (33,96%). Todavia, tal característica não explica o baixo rendimento obtido com o óleo de pinhão manso, pois este é altamente enriquecido em ácido linoleico (42,88%) que também é um coletor eficaz para apatita conforme demonstrado por Brandão *et al.* (1994). Mata (2019) também verificou, através de testes de microflotação de apatita e flotação em bancada de minério fosfático, utilizando óleos vegetais como coletores, que os óleos com uma razão ácido oleico/linoleico maior em

suas composições resultaram em melhores desempenhos em termos de teor e recuperação de P_2O_5 no concentrado. Além disso, o OPMAC apresentou flotabilidade semelhante ou superior ao Flotigam 5806, o que também pode ser observado no trabalho conduzido por Pachêco (2016).

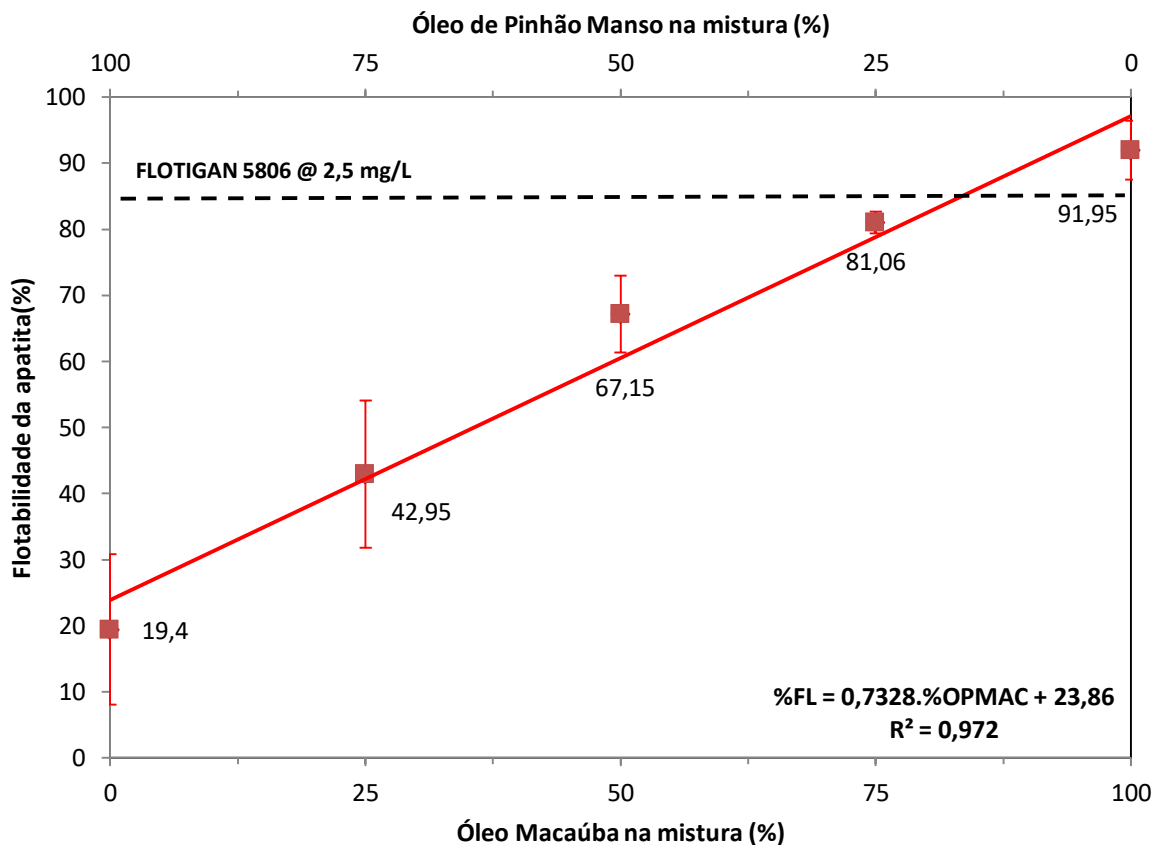


Figura 1 – Flotabilidade média da apatita em função das proporções de misturas dos óleos saponificados da polpa da macaúba e pinhão manso, tendo como parâmetro a flotabilidade do Flotigam 5806 (linha preta tracejada). As barras vermelhas representam o desvio padrão das triplicatas.

No entanto, o OPIM possui um custo estimado de aproximadamente R\$1,00/L, segundo levantamento realizado por Berggmann *et al.* (2013) em relação à produtividade no plantio da semente. Já o OPMAC e o Flotigam 5806 apresentam um custo de R\$5,00/L e R\$10,45/L, respectivamente, de acordo com Pachêco (2016). Dessa forma, é plausível supor que mesmo com uma queda de flotabilidade, pode haver um aumento no custo-benefício com a adição de uma determinada proporção de óleo de pinhão manso. Por isso, foi efetuada a regressão linear (linha vermelha da Fig. 1) com base nos dados experimentais, resultando na Eq. 1, a qual descreve a flotabilidade (%F) da apatita em função da proporção de OPMAC (%OPMAC). O coeficiente de determinação (R^2) calculado mostra uma correlação de 97,2%, se mostrando representativa.

$$\%F = 0,7328 \times \%OPMAC + 23,86 \quad (1)$$

Foi estipulado como meta de flotabilidade da apatita um valor de 90% para determinação da proporção de óleos, resultando em uma proporção de 90% de OPMAC e

10% de OPIM necessária para se alcançar tal nível de flotabilidade de acordo com o modelo linear da equação 1.

Realizou-se uma comparação entre o custo/L de cada reagente puro em relação ao custo resultante da mistura de óleos na proporção calculada. Os resultados estão apresentados na Figura 2.

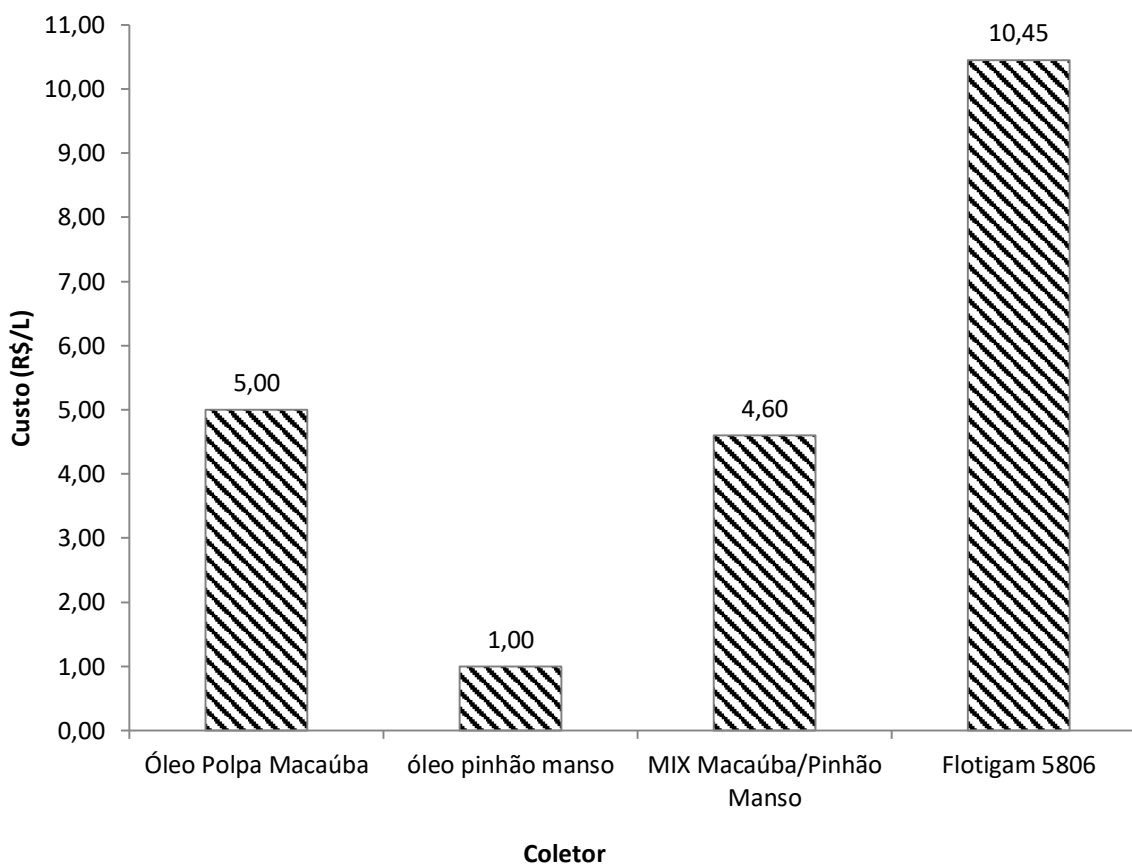


Figura 2 – Custo em litros dos reagentes puros e da mistura de óleos de proporção ótima (90:10) utilizados para flotação de apatita, com perspectiva de recuperação do mineral no patamar de 90%.

Pode-se observar que dentre os coletores que promoveram uma flotabilidade da apatita no patamar de 90%, a mistura de óleos (90:10) apresentou o menor custo (R\$4,60/L), um valor 44% menor do que o custo do Flotigam 5806 e 8% menor em comparação ao OPMAC. Portanto, os resultados demonstram que há a possibilidade de redução nos custos da flotação, sem prejuízo na recuperação da apatita, ao se empregar a mistura de óleos em substituição ao coletor industrial. Entretanto, são necessários testes adicionais em escala de bancada e piloto a fim de comprovar a viabilidade técnico-econômica da utilização da mistura de óleos como coletores.

4. CONCLUSÕES

O óleo de polpa de macaúba, fruto tipicamente encontrado do cerrado brasileiro e rico em ácido oleico (ômega 9), demonstrou um excelente poder de hidrofobização da superfície da apatita. Seu desempenho comprovou-se equiparável ao do coletor industrial

Flotigam 5806, enquanto o óleo de pinhão manso acarretou em uma flotabilidade bem menor para a apatita. A proporção entre os tipos de ácidos graxos constituintes dos óleos pode ter influenciado o desempenho dos reagentes, uma vez que o OPMAC possui mais ácido oleico em comparação ao OPIM.

Todavia, como o OPIM tem um preço de venda bem inferior ao OPMAC, a mistura resultante dos dois óleos em uma proporção de 90:10 (OPMAC:OPIM) impactou na redução do custo final do coletor (8% menor que o OPMAC e 44% menor que o Flotigam 5806) ao mesmo tempo em que manteve a flotabilidade da apatita em patamares próximos ao Flotigam 5806 e o OPMAC puro. Em suma, o presente estudo aponta a possível aplicabilidade da mistura dos óleos testados, que são compostos naturais, de baixo custo e não-tóxicos, como coletores na flotação de apatita. Como trabalhos futuros, sugere-se uma avaliação econômica aplicada ao volume de produção anual de uma mineradora de fosfato, e seu consumo de reagentes, a fim de demonstrar a redução de custos com a utilização do *mix* de óleos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento CNPq pela bolsa de iniciação científica, CAPES, FUNAPE e FAPEG pelo apoio financeiro que permitiu a elaboração desta pesquisa. E adicionalmente, à Embrapa unidade Brasília/DF e à Universidade Federal de Goiás.

6. REFERÊNCIAS

Albuquerque RO Alternativas de Processo para Concentração do Minério Fósforo-Uranífero de Itataia. [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2010.

Baltar C. Flotação no Tratamento de Minério. Recife: UFPE; 2008.

Bergmann JC, Tupinambá DD, Costa OYA, Almeida JRM, Barreto CC, Quirino BF. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 21(): 411-420.

Brandão PRG, Caires LG, Queiroz DSB. Vegetable Lipid Oil-Based Collectors in the Flotation of Apatite Ores. *Minerals Engineering* 1994; 7(7); 917-925.

Ciconini G. Caracterização de frutos e óleos de polpa de macaúba dos biomas cerrado e pantanal do estado de Mato Grosso do Sul. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande; 2012.

Costa DS. Uso de óleos vegetais amazônicos na flotação de minérios fosfáticos. [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2012.

Fortes ICP, Baugh PJ. Estudo da pirólise analítica on-line de óleos de frutos de Macaúba (*Acrocomia sclerocarpa* M) via GC/MS. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 1999; 10(6); 469-477.

Mata CED. Desempenho de ácidos graxos na flotação seletiva de apatita proveniente do minério fosfático de Angico dos Dias-BA. [Dissertação de Mestrado]. Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto; 2019.

Pachêco CAT. Análise técnica e econômica do uso do óleo da polpa de macaúba (*Acrocomia Aculeta*) como coletor na flotação. [Dissertação de Mestrado]. Unidade Acadêmica Especial de Gestão e Negócios, Universidade Federal de Goiás, Catalão; 2016.

Amorim, A.L.S.; Silva, A.C.; Silva, E.M.S.; Lima, R.V.O.; Mata, C.E.D.

Pachêco CAT, Silva AC, Silva EMS, Alves BE. Macaúba's pulp oil as collector in apatite froth flotation. In: Proceedings of the International Mineral Processing Symposium; 2014. Kusadasi, Turquia. p. 359-366.

REMAPE - Rede Macaúba de Pesquisa. Mineração [Internet] 2015; [citado 2019 Set 07]. Disponível em: <http://www.macauba.ufv.br/>

Rosado TB, Laviola BG, Faria DA, Pappas MR, Bhering LL, Quirino B, Grattapaglia D. Molecular markers reveal limited genetic diversity in a large germplasm collection of the biofuel crop *Jatropha Curcas* L. in Brazil. *Crop Science* 2010; 50(); 2372-2382.

Silva AC, Cara DVC, Silva EMS, Leal GS, Machado AM, Silva LM. Apatite flotation using saponified baker's yeast cells (*Saccharomyces cerevisiae*) as a bioreagent. *Journal of Materials Research and Technology* 2019; 8(1); 752-758.

Silva AC, Moraes ILA, Silva EM, Silva Filho CM, Sousa DN. Seletividade do óleo de pinhão manso (*Jatropha Curcas* L.) na microflotação de apatita, calcita e quartzo. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração* 2018; 15(3); 341-349.

Souza AE, Fonseca DS. Fosfato. Brasília: DNPM; 2008; 546-568.

Zuppa T. Avaliação das potencialidades de plantas nativas e introduzidas no Cerrado na obtenção de óleos e gorduras vegetais. [Dissertação de Mestrado]. Instituto de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia; 2001.