


Avaliação de amidos de milho alternativos na microflotação de hematita e quartzo

Débora Nascimento Sousa¹ 

Luís Alberto Silva² 

André Carlos Silva^{3*} 

Elenice Maria Schons Silva³ 

Resumo

As jazidas de alta qualidade estão se tornando escassas globalmente, impulsionando as mineradoras a investir em tecnologias para aproveitar melhor os recursos minerais. Os minérios atuais são mais pobres e distribuídos em granulometrias mais finas, levando a um aumento no estudo dos reagentes usados na técnica de flotação mineral, uma das principais operações para concentrar minerais finos. O objetivo desse estudo foi comparar a aplicação de três tipos diferentes de amidos derivados do milho, variando suas dosagens, nos testes de microflotação de hematita e de quartzo. Os amidos de milho alternativos mostraram níveis mais elevados de amilopectina em comparação com o amido de milho convencional, sendo o HIPIX100 o que apresentou o teor mais alto desse componente. Observou-se que tanto o tipo quanto a dosagem do depressor, assim como a interação entre eles, tiveram influência estatisticamente significativa nas respostas de flotabilidade da hematita e do quartzo. Os resultados sugerem o HIPIX101 como o reagente mais promissor quando comparado com o amido de milho convencionalmente empregado na indústria mineral brasileira.

Palavras-chave: Microflotação; Hematita; Quartzo; Amido; Milho.

Evaluation of alternative corn starches in hematite and quartz microflotation

Abstract

High-quality deposits are becoming scarce globally, driving mining companies to invest in technologies to make better use of mineral resources. Current ores are poorer and distributed in finer grain sizes, leading to an increase in the study of reagents used in the mineral flotation technique, one of the main operations to concentrate fine minerals. The objective of this study was to compare the application of three different types of corn-derived starches, varying their dosages, in hematite and quartz microflotation tests. Alternative corn starches showed higher levels of amylopectin compared to conventional corn starch, with HIPIX100 having the highest content of this component. It was observed that both the type and dosage of the depressant, as well as the interaction between them, had a statistically significant influence on the flotability responses of hematite and quartz. The results suggest HIPIX101 as the most promising reagent when compared to corn starch conventionally used in the Brazilian mineral industry.

Keywords: Microflotation; Hematite; Quartz; Starch; Corn.

1 Introdução

O aumento da exploração mineral das reservas de minério de ferro de elevado teor e a subsequente redução dessas fontes de qualidade destacam a importância de realizar pesquisas com o objetivo de viabilizar economicamente a extração e utilização de minérios de ferro de teores mais

baixos [1]. O ferro, além de ser um elemento que constitui 6% da crosta terrestre [2], tendo como principais minerais portadores a magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \times n\text{H}_2\text{O}$) e siderita (FeCO_3) [3], teve um aumento esperado da sua produção de minério de

¹ Departamento de Mineração, Instituto Federal Goiano, IFGoiano, Catalão, GO, Brasil.

² Centro de Inovação e Tecnologia, CIT/SENAI, Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral, ISIPM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral, Universidade Federal de Catalão, UFCAT, Catalão, GO, Brasil.

*Autor correspondente: ancarsil@ufcat.edu.br



5% em relação a 2018, principalmente devido ao incremento na produção da Austrália, Brasil, China e Índia [4].

Existem três métodos para concentrar o minério de ferro, os quais são escolhidos com base nas características granulométricas e no teor do material: concentração gravítica, concentração magnética e flotação [5]. Contudo, tanto a concentração gravítica quanto a magnética apresentam limitações quando se trata de granulometrias extremamente grossas ou finas, e a redução dos depósitos de alto teor está levando as empresas a investir em estudos voltados para o desenvolvimento de tecnologias capazes de recuperar o ferro a partir dos resíduos e partículas finas gerados durante o processamento convencional [6]. Além disso, os minérios de ferro utilizados na indústria siderúrgica devem atender a padrões específicos de teor de ferro e pureza [7], tornando a flotação a abordagem mais eficiente em termos tecnológicos e econômicos para concentrar o minério [8].

A flotação é uma das técnicas de destaque global empregadas no processamento de minerais. O princípio da técnica está na capacidade de usar reagentes químicos para aumentar a hidrofobicidade da superfície do mineral de interesse em comparação com os minerais indesejados [9]. Previamente ao desenvolvimento do processo de flotação industrial, testes são realizados em escala laboratorial, em tubo de Hallimond modificado, para estabelecer parâmetros essenciais do processo, tais como a relação entre o tamanho máximo das partículas flotadas, sua densidade e hidrofobicidade [10]. No caso do minério de ferro, a flotação pode ser direta ou reversa, sendo esta última técnica consagrada no Brasil. Dentre os reagentes empregados no processo destacam-se a amina como coletor do quartzo e espumante, e o amido gelatinizado, majoritariamente de milho, como depressor dos minerais de ferro [11].

Neste intuito, o presente trabalho teve como objetivo a realização de testes de microflotação com diferentes tipos e dosagens de depressores à base de milho, utilizando o tubo de Hallimond modificado, visando avaliar o comportamento de diferentes tipos de amido alternativos quando comparado ao amido de milho convencional utilizado na usina de processamento mineral.

2 Metodologia

2.1 Preparação e caracterização dos minerais

As amostras de hematita e quartzo foram oriundas da mina do Pico, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero. Uma etapa de adequação granulométrica desse material foi feita previamente aos ensaios de flotação. A cominuição dos minerais foi realizada em moinho de bolas e a classificação foi feita por peneiramento a úmido, utilizando uma série de peneiras Tyler. A faixa granulométrica escolhida para os testes de flotação foi -149 + 105 μm (-100# + 150#), de forma que o material retido em +149 μm (+100#) retornou ao moinho enquanto o passante em -105 μm (-150#) foi descartado

como lama. O material foi seco em estufa, a 60 °C, durante 24 horas e, posteriormente, um imã de ferrite com campo de 2 kG foi empregado sobre as amostras de quartzo para a remoção de possíveis contaminantes das etapas anteriores.

A caracterização química e mineralógica das amostras seguiu a metodologia empregada por Silva et al. [12].

2.2 Preparação dos reagentes e caracterização dos amidos

O coletor utilizado foi o Flotigam EDA, da Clariant. A saponificação deste reagente seguiu as recomendações da fabricante e consistiu em adicionar 1,0 g de coletor em 100,0 mL de água destilada 1% (p/v) sob auxílio de agitação magnética. Os modificadores de pH empregados foram o ácido clorídrico e o hidróxido de sódio, ambos a 1% (p/v). Os amidos de milho utilizados foram o HIPIX100 e o HIPIX101, ambos doados pela empresa Ingredient, além do amido de milho tradicionalmente utilizado pela empresa mineradora. Esses reagentes foram gelatinizados adicionando-se 2,7 mL de hidróxido de sódio a 10% (p/v) em uma solução de 20,0 mL de água destilada e 1,0 g de amido. A solução foi mantida sob agitação magnética até a completa gelatinização. As soluções de coletor e de depressor foram preparadas diariamente para evitar a degradação e retrogradação dos respectivos reagentes. A caracterização dos depressores foi feita a partir da determinação do teor de amilose, conforme procedimento da AACC [13].

2.3 Ensaios de microflotação

Os ensaios de microflotação foram executados em tubo de Hallimond modificado com o auxílio de um agitador magnético e de um extensor de altura para evitar o arraste hidrodinâmico das partículas. Os testes de microflotação foram realizados seguindo um planejamento fatorial 3^k completo em triplicata, com duas variáveis independentes (dosagem e tipo de depressor) e duas variáveis respostas (flotabilidade da hematita e flotabilidade do quartzo), empregando um nível de significância de 5%. A normalidade dos dados foi testada usando o Teste de Shapiro-Wilk. A flotabilidade do quartzo e da hematita foram analisadas quanto ao tipo e à dosagem dos depressores, sendo o amido de milho convencional utilizado para fins de comparação entre os resultados. A seletividade na flotação catiônica reversa de minério de ferro é alcançada quando um depressor se adsorve na superfície da hematita que será deprimida e não prejudica a flotabilidade do quartzo. Os valores das variáveis vazão de ar e pressão foram escolhidos por proporcionarem um menor arraste hidráulico dos minerais na granulometria adotada [14]. O pH adotado foi de 10,5 para todos os testes, pois neste valor a éter-amina tem uma maior afinidade sobre a superfície do quartzo [15]. Os tempos de condicionamento do coletor e dos depressores foram determinados conforme procedimento operacional da

Clariant. A água destilada foi empregada no decorrer de todo o ensaio e, após a flotação, as frações flotada e afundada foram recolhidas, filtradas a vácuo e secas em estufa, a 60 °C. Todos os parâmetros operacionais adotados nos ensaios de microflotação em tubo de Hallimond modificado podem ser vistos na Tabela 1.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização dos depressores

Na Figura 1 é exibido um gráfico representando os conteúdos de amilose e amilopectina nos amidos investigados neste estudo. O amido convencional revelou uma proporção de amilose próxima àquela encontrada no estudo de Weber, Collares e Chang [16] (71,9%). Por outro lado, o HIPIX100 demonstrou teor de amilose um pouco acima do identificado no estudo conduzido por Lu et al. [17] (25%), mas muito próximo ao identificado no estudo de Bustillos-Rodríguez et al. [18] (21,9% e 21,5%). Por fim, o HIPIX101 apresentou teor de amilose semelhante ao amido Ziam utilizado no trabalho de Matos et al. [19] (80%).

3.2 Ensaios de microflotação

Os resultados de flotabilidade média da hematita em função da dosagem e do tipo do depressor podem ser vistos na Figura 2a. Para a dosagem de 400 g/t, a flotabilidade média da hematita variou de $6,41 \pm 0,70\%$ a $25,65 \pm 2,00\%$. É possível notar que a flotabilidade média da hematita foi menos suscetível à variação da dosagem com o HIPIX100. Ainda assim, nas dosagens de 800 e 1600 g/t, a flotabilidade média da hematita se manteve estável para o amido de milho e o HIPIX101. Os resultados sugerem que o aumento na dosagem do depressor reduz a flotabilidade média da hematita. Contudo, essa redução foi notável até a dosagem de 800 g/t, visto que os resultados após dobrar essa quantidade se mostraram bastante similares, o que não justificaria o aumento da quantidade do reagente. Esses achados corroboram as observações de Nheta et al. [20], os quais afirmaram que a maioria do material na polpa de flotação se torna hidrofílico em dosagens maiores de

depressor, resultando em uma maior quantidade de sílica no afundado. Adicionalmente, esses autores indicaram que a faixa de dosagem entre 400 g/t e 600 g/t proporcionou condições otimizadas.

Os dados de flotabilidade média do quartzo em relação à dosagem e ao tipo de depressor estão ilustrados na Figura 2b. As maiores flotabilidades para o quartzo ocorreram com uma dosagem de 400 g/t, independentemente do tipo de amido considerado, sendo especialmente notável no caso do HIPIX100 ($94,51\% \pm 1,14\%$). Esse achado sugere uma adsorção relativamente menor do HIPIX100 na superfície do quartzo em comparação aos outros dois tipos de amido.

De maneira geral, um aumento na dosagem do depressor resultou em uma redução na flotabilidade do quartzo para ambos os amidos, mas, no entanto, essa resposta demonstrou ser menos sensível às variações de dosagem quando o HIPIX100 foi utilizado.

A Tabela 2 (lado a) exibe os resultados da análise de variância referente à flotabilidade da hematita. O modelo utilizado demonstrou ser estatisticamente significativo ($p < 0,05$), assim como as variáveis tipo e dosagem de depressor e a interação entre elas. Os dados seguiram a distribuição normal ($p > 0,05$) e os resíduos foram homocedásticos. Evidencia-se que os parâmetros investigados exerceram um impacto estatisticamente significativo sobre a flotabilidade da hematita, destacando-se a dosagem de depressor como o fator mais influente, seguido pelo tipo de depressor. A Tabela 2 (lado b) apresenta os resultados da análise de variância referente à flotabilidade do quartzo.

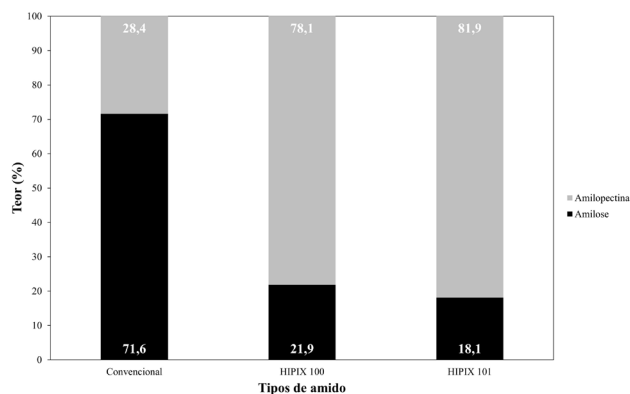


Figura 1. Teor de amilose e amilopectina dos amidos.

Tabela 1. Parâmetros operacionais dos ensaios de microflotação em tubo de Hallimond modificado.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Vazão de ar (cm ³ /min)	40	Tempo de flotação (min)	3
Pressão de ar (psi)	10	Massa mineral (g)	1
Tempo de condicionamento depressor (min)	5	Dosagem de coletor (g/t)	70
Tempo de condicionamento coletor (min)	1	Tipo de depressor	Amido de milho, HIPIX100 e HIPIX101
Volume do tubo de Hallimond (mL)	320	Dosagem de depressor (g/t)	400, 800 e 1600

Tabela 2. Análise de variância para (a) flotabilidade da hematita e (b) flotabilidade do quartzo

(a)					(b)				
Fonte	GL	Contribuição	Valor F	Valor-p	Fonte	GL	Contribuição	Valor F	Valor-p
Modelo	8	98,81%	186,40	0,000	Modelo	8	99,13%	255,98	0,000
Linear	4	77,91%	293,95	0,000	Linear	4	97,20%	502,01	0,000
A	2	29,31%	221,19	0,000	A	2	89,78%	927,41	0,000
B	2	48,60%	366,71	0,000	B	2	7,42%	76,61	0,000
AB	4	20,90%	78,86	0,000	AB	4	1,93%	9,96	0,000
Erro	18	1,19%			Erro	18	0,87%		
Total	26	100,00%			Total	26	100,00%		

A: Tipo de depressor. B: Dosagem de depressor. AB: Interação entre o tipo de depressor e a dosagem de depressor.

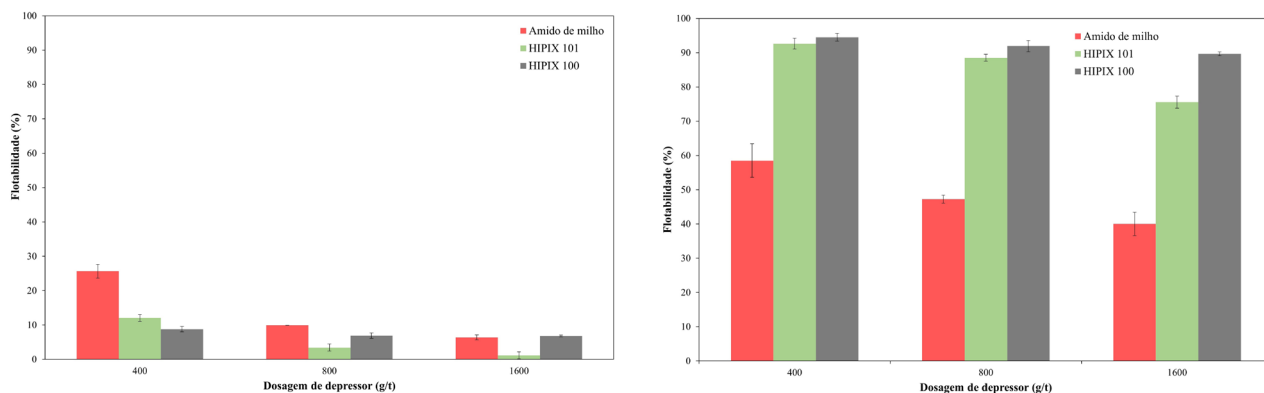


Figura 2. Flotabilidade média da (a) hematita e do (b) quartzo em função da dosagem e do tipo de depressor.

A Figura 3 apresenta os resultados de otimização das variáveis respostas analisadas concomitantemente. Para a otimização em questão foi solicitado o valor máximo de flotabilidade do quartzo e o mínimo de flotabilidade da hematita. A otimização simultânea das respostas resultou em uma máxima flotabilidade do quartzo (88,52%) e uma flotabilidade mínima de hematita (3,43%) utilizando o HIPIX101 na dosagem de 800 g/t.

O valor de desejabilidade composta (D) após o ajuste dos dados foi de 0,8862 e, para as desejabilidades individuais (d) flotabilidade de quartzo e flotabilidade de hematita, foram de 0,88244 e 0,88999, respectivamente. Os valores mencionados anteriormente correspondem à faixa aceitável ou excelente, de acordo com parâmetros estabelecidos por Akhanazarova e Kafarov [21]. Uma das possíveis hipóteses que podem explicar a escolha desse reagente está ligada aos principais componentes do amido: amilopectina e amilose. A amilose é um polímero linear com massa molecular média a alta. A amilopectina é um polímero altamente ramificado com as mesmas ligações da amilose e algumas ligações adicionais e tem massa molecular muito alta [22]. A proporção amilose/amilopectina não é constante em vegetais distintos, ou em tipologias distintas de um mesmo vegetal e determina

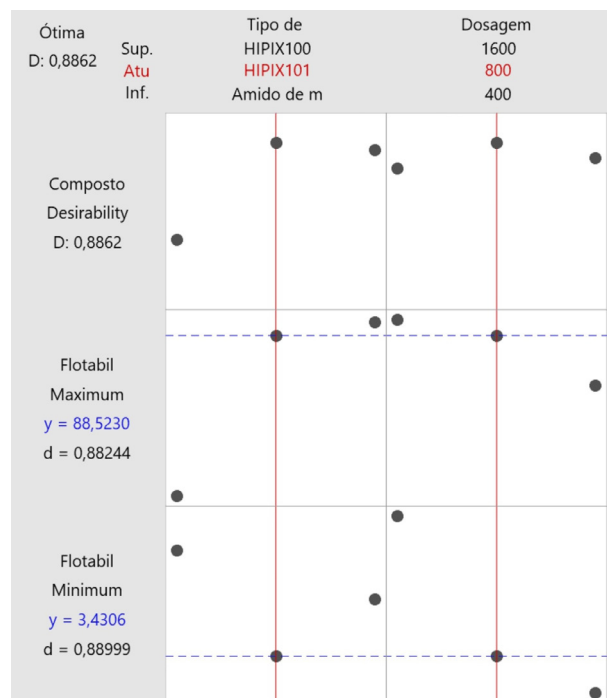


Figura 3. Otimização simultânea das respostas flotabilidade de hematita e quartzo em função das variáveis tipo e dosagem de depressor.

algumas das propriedades do amido [23]. Alguns estudos já evidenciaram a prevalência do teor de amilopectina sobre a depressibilidade de alguns minerais, sobretudo da hematita. Sendo assim, sugere-se que o HIPIX101 tenha se destacado perante os dois outros amidos devido ao fato de apresentar um maior teor de amilopectina em relação aos demais. Peres e Correa [24] explicaram a relevância da proporção de amilose/ amilopectina no amido durante a depressão da hematita. A amilopectina teve um caráter depressor mais acentuado em relação a amilose quando uma éter amina primária foi usada como coletor. No entanto, foram obtidos melhores resultados ao usar amido com uma proporção de amilopectina para amilose de 75% / 25% em vez de amilopectina pura. No estudo de Yang et al. [25], entre os amidos testados, o amido ceroso e o amido normal, que possuem teores relativamente altos de amilopectina, são os preferidos para serem usados na separação por flotação do quartzo da hematita como depressor após a preparação adequada da solução.

4 Conclusão

O desempenho de três depressores diferentes foi investigado na flotação reversa catiônica da hematita usando amina éter como coletor. A análise estatística revelou que

tanto o tipo quanto a dosagem de depressor, bem como a interação entre esses fatores, tiveram uma influência estatística significativa na flotabilidade da hematita e do quartzo. Os resultados apontam para uma diminuição na flotabilidade da hematita com o aumento das doses do depressor, sendo que a utilização de 800 g/t resultou na melhor relação custo-benefício. Os melhores resultados de flotabilidade do quartzo foram obtidos utilizando uma dosagem de 400 g/t. Na comparação simultânea da flotabilidade da hematita e do quartzo, a utilização do depressor HIPIX101 a uma dosagem de 800 g/t se sobressai em relação aos outros dois depressores, provavelmente devido ao seu elevado teor de amilopectina. Como forma de corroborar os resultados obtidos no tubo Hallimond, torna-se imprescindível a realização de testes de flotação em escala de bancada (utilizando célula ou coluna) empregando amostras de minério de ferro.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral (LaMPPMin) e ao Instituto Federal Goiano, à Anglo American pela doação dos minerais e das análises químicas, às empresas Clariant e Ingredion pela doação dos reagentes e à FAPEG pelo financiamento da pesquisa.

Referências

- Mhonde NP, Wiese JG, McFadzen B. Comparison of collector performance for a South African and a Brazilian iron ore considering mineralogical characteristics. *Minerals Engineering*. 2017;113:55-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.006>.
- Sheppard E, Porter PW, Faust DR, Nagar R. *A world of difference: encountering and contesting development*. 2. ed. New York: The Guilford Press; 2016.
- Filippov LO, Severov VV, Filippova IV. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2014;127:62-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2014.01.002>.
- National Minerals Information Center. 2020. Iron ore statistics and information. USA: USGS; 2020. [acesso em 9 abr. 2020]. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/.
- Lu L, editor. Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation. In: Xiong D, Lu L, Holmes RJ. *Iron ore: mineralogy, processing & environmental sustainability*. Cambridge: Elsevier; 2015. p. 283-307.
- Pattanaik A, Venugopal R. Investigation of adsorption mechanism of reagents (surfactants) system and its applicability in iron ore flotation – an overview. *Colloid and Interface Science Communications*. 2018;25:41-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colcom.2018.06.003>.
- Veloso CH, Filippov LO, Filippova IV, Ouvrard S, Araujo AC. Investigation of the interaction mechanism of depressants in the reverse cationic flotation of complex iron ores. *Minerals Engineering*. 2018;125:133-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.031>.
- Nakhaei F, Irannajad M. Reagents types in flotation of iron oxide minerals: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018;39(2):89-124. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2017.1391245>.
- Quast K. The use of zeta potential to investigate the pKa of saturated fatty acids. *Advanced Powder Technology*. 2016;27(1):207-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2015.12.003>.
- Drzymala J. Characterization of materials by Hallimond tube flotation, Part 3. Maximum size of floating and interacting particles. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;55(3):203-218. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(98\)00033-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00033-7).

- 11 Araujo AC, Viana PRM, Peres AEC. Reagents in iron ores flotation. *Minerals Engineering*. 2005;18(2):219-224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.023>.
- 12 Silva EMS, Peres AEC, Silva AC, Florêncio DL, Caixeta VH. Sorghum starch as depressant in mineral flotation: part 2 – flotation tests. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(1):403-410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.002>.
- 13 American Association of Cereal Chemistry. AACC Methods 08-21.01. Prediction of ash content in wheat flour – near-infrared method. St. Paul, Minnesota: AACC; 2000.
- 14 Guimarães P Jr, Silva AC, Silva EMS. Modelling the hydraulic entrainment phenomenon in microflotation. In: *Proceedings of II International Symposium on Sustainable Mineral Processing*; 2015; Antalya. Antalya: editora FLOGEN Star Outreach; 2015. p. 186-192.
- 15 Shrimali K, Yin X, Wang X, Miller JD. Fundamental issues on the influence of starch in amine adsorption by quartz. *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017;522(5):642-651. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.03.031>.
- 16 Weber FH, Collares-Queiroz FP, Chang YK. Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amilose. *Food Science and Technology (Campinas)*. 2009;29:748-753.
- 17 Lu D, Yuhua W, Yuehua H, Wei S, Tao J, Yan L. Reverse flotation of ultrafine magnetic concentrate by using mixed anionic/cationic collectors. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2017;53(2):724-736. <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170204>.
- 18 Bustillos-Rodríguez JC, Tirado-Gallegos JM, Ordóñez-García M, Zamudio-Flores PB, Ornelas-Páz JJ, Acosta-Muñoz CH, et al. Physicochemical, thermal and rheological properties of three native corn starches. *Food Science and Technology (Campinas)*. 2018;39:149-157. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.28117>.
- 19 Matos SS, Alexandrino JS, Ferreira KC. Comportamento da amilopectina na flotação de minério de ferro. In: *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do Simpósio de Mineração*; 2018; São Paulo. São Paulo: ABM; 2018. p. 1-12. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-31345>.
- 20 Nheta W, Lubisi TP, Masemola S, Makhatha ME. Beneficiation of haematite from fluorspar tailings by reverse flotation. In: *Proceedings of World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*; 2015; Spain. Spain: editora Avestia; 2015. p. 346-1-346-11.
- 21 Akhanazarova S, Kafarov V. *Experiment optimization in chemistry and Chemical engineering*. Moscow: Mir; 1982.
- 22 Pearse MJ. An overview of the use of chemical reagents in mineral processing. *Minerals Engineering*. 2005;18(2):139-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2015.12>.
- 23 Tester RF, Karkalas J, Qi X. Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*. 2004;39:151-165. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>.
- 24 Peres AEC, Correa MI. Depression of iron oxides with corn starches. *Minerals Engineering*. 1996;9(12):1227-1234. [http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875\(96\)00118-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(96)00118-5).
- 25 Yang L, Li C, Wang L. Dissolution of starch and its role in the flotation separation of quartz from hematite. *Powder Technology*. 2017;320:346-357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.061>.

Recebido em: 26 Set. 2023

Aceito em: 21 Nov. 2023