




Influência de flocculantes nas características reológicas e de sedimentação de polpas de rejeito de minério de ferro

Marina Martins¹ 
Michelly dos Santos Oliveira^{1*} 
Francisco Gregianin Testa¹ 

Resumo

O armazenamento de rejeitos em forma de polpa diluída, tem sido uma questão crítica para a indústria mineral, logo que falhas nas barragens podem gerar potenciais danos ambientais, sociais e econômicos. Diante disto, o desaguamento dos rejeitos torna-se uma alternativa para que as barragens possam conter polpas menos diluídas que além de causar menores danos em caso de falha, permitem o reuso da água. Para o setor mineral, também é fundamental a avaliação reológica das polpas adensadas, pois, além de afetar a metodologia de disposição do rejeito, pode influenciar no bombeamento e transporte do material. Neste trabalho, foram avaliadas as características de polpas de rejeito de minério de ferro, com o propósito de analisar a influência de flocculantes na tensão de escoamento do material e, ainda, nas características do adensamento, tais como a velocidade de sedimentação, a turbidez do clarificado e o percentual mássico de sólidos do *underflow*. Para isso foram realizados ensaios de sedimentação em proveta e *slump test* variando a dosagem dos flocculantes Magnafloc 351 e Alclar 662. As polpas com percentual mássico entre 72 e 75% apresentaram características de polpas de alta densidade, com tensão de escoamento superior a 40 Pa, mesmo sem adição de flocculante. Contudo, a adição de flocculantes pôde proporcionar um incremento de até 26,8% na tensão de escoamento quando se utilizou a poliácridamida, atingindo a tensão máxima de 140 Pa. Além disso, o uso do Magnafloc 351 em 120 g/t proporcionou um clarificado com turbidez 10 vezes menor do que sem o uso do reagente.

Palavras-chave: Rejeito; Reologia; Desaguamento; Reuso de água.

Influence of flocculants on the rheological and sedimentation characteristics of iron ore tailings slurries

Abstract

The storage of tailings in the form of diluted slurry has been a critical issue for the mining industry, given that dam failures can lead to potential environmental, social, and economic damages. Faced with this, dewatering of tailings becomes an alternative so that dams can contain less diluted slurries, which, in addition to causing fewer damages in case of failure, allows for water reuse. For the mining sector, the rheological evaluation of thickened slurries is also fundamental, as it not only affects the waste disposal methodology but can also influence the pumping and transportation of the material. In this study, the characteristics of iron ore tailings were evaluated with the purpose of analyzing the influence of flocculants on the flow stress of the material and, furthermore, on thickening characteristics such as sedimentation velocity, clarity of the clarified liquid, and the mass percentage of solids in the underflow. To achieve this, sedimentation tests in a graduated cylinder and slump tests were conducted, varying the dosage of the flocculants Magnafloc 351 and Alclar 662. Slurries with mass percentages between 72 and 75% exhibited characteristics of high-density slurries, with a flow stress exceeding 40 Pa even without the addition of flocculant. However, the addition of flocculants could provide an increase of up to 26.8% in the flow stress when using polyacrylamide, reaching a maximum stress of 140 Pa. Additionally, the use of Magnafloc 351 at 120 g/t resulted in clarified liquid with a turbidity 10 times lower than without the use of the reagent.

Keywords: Tailings; Rheology; Dewatering; Water reuse.

¹Departamento de Minas e Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Araxá, MG, Brasil.

*Autor correspondente: michelly@cefetmg.br



1 Introdução

Com o aumento progressivo de rejeitos gerados pela indústria mineral, a quantidade de barragens vem crescendo. Contudo, estas estruturas possuem dificuldade e alto custo de monitoramento. Os rejeitos depositados em forma de polpa convencional podem proporcionar às barragens problemas de instabilidade e possibilidade de falha, ameaçando a segurança da indústria e das pessoas, sendo capaz de causar consideráveis danos ambientais [1,2].

Diante deste cenário, a adoção de métodos alternativos para a disposição de rejeitos se torna uma medida de segurança e sustentabilidade necessária. O desaguamento de rejeitos, visando à posterior disposição desses materiais, tem se mostrado uma alternativa viável para a mitigação do problema. De acordo com Fitton e Roshdih [3], a prática mais comum para o desaguamento de rejeitos é o espessamento, que pode gerar polpas de alta densidade e até mesmo pastas. Diferentemente das polpas convencionais, essas são caracterizadas como um material adensado, possuindo uma baixa quantidade de água, com percentuais de sólidos variando de 55% a 75%. Tanto as polpas de alta densidade quanto as pastas de rejeitos podem ser descritas como fluidos homogêneos não segregáveis, que não permitem a drenagem de água quando dispostos em uma superfície estável [4,5].

Sendo assim, o comportamento reológico das suspensões de rejeito, é um fator de bastante relevância a ser estudado, em especial quando se pondera o bombeamento de polpas. Com o aumento do percentual de sólidos, as suspensões passam a se comportar como fluidos não-newtonianos, apresentando tensão limite de escoamento (τ_0), que é considerada a tensão de cisalhamento mínima necessária para que o fluido sofra deformação e fluxo irreversíveis. As pastas minerais são caracterizadas por apresentarem tensão limite de escoamento mínima de 200 Pa, sendo assim o controle desta variável é essencial quando se pensa em disposição de rejeitos adensados [6-8].

O aumento da produção de minério de ferro, em decorrência da alta demanda mundial e da exaustão das jazidas de altos teores, acarretou em um aumento na geração de rejeitos. Dentro desse contexto, este estudo teve o objetivo de avaliar as características de polpas de rejeito de minério de ferro em variadas % de sólidos, com e sem adição de floclantes, para, a partir da tensão de escoamento, classificá-las como como polpa de alta densidade ou pastas. Além disso, o trabalho analisou o efeito de diferentes condições de dosagens de floclantes na turbidez, velocidade de sedimentação e percentual mássico de sólidos do *underflow* durante a sedimentação do rejeito.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

A amostra utilizada neste estudo foi um rejeito de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero, município de Itatiaiuçu – MG. A Tabela 1 apresenta as características do rejeito. O material foi caracterizado quanto a composição química pelo método de fluorescência de raios -X, utilizando-se o equipamento Shimadzu - EDX-720. A caracterização granulométrica foi realizada via difração a laser pelo equipamento *Bettersize S3 plus*. A densidade do material foi dada pelo picnômetro a gás da *ACP Instruments*.

Os reagentes Magnafloc 351 e Alclar 662, fabricados pela BASF, foram utilizados como floclantes, o primeiro é uma poliacrilamida não iônica e o segundo uma poliacrilamida aniônicas, eles foram diluídos em solução aquosa para concentração de 0,05% (m/m).

2.2 Método de avaliação da reologia

Para avaliar a reologia do material, foram realizados testes de abatimento (*slump test*), utilizando um cilindro de PVC com altura e diâmetros iguais a 4,74 cm. As polpas foram preparadas artificialmente em um béquero de vidro e homogeneizadas com um bastão de vidro. A dosagem do floclante foi mantida em 20g/t para todos os testes de abatimento. A Tabela 2 apresenta as variáveis e níveis do planejamento experimental elaborado com intuito de investigar a influência do uso dos floclantes na reologia das polpas de rejeito.

O estudo da influência da adição de floclantes nas polpas de rejeito é fundamental, uma vez que o transporte e a deposição desse material estão diretamente ligados à sua classificação, seja como polpa convencional, polpa de alta densidade ou pasta. Essa diferenciação não deve ser feita considerando apenas o percentual de sólidos da polpa. Para isso, os testes de abatimento (*slump test*) foram realizados, pois, a altura de abatimento é utilizada como um parâmetro de controle para a avaliação da consistência de pastas, podendo a partir da metodologia descrita por Phasias et al. [9], em que se faz uso da Equação 1, obter a tensão de escoamento do material.

$$\tau y' = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{S'} \quad (1)$$

Onde S é o *slump* adimensional, $\tau y'$ é a tensão de escoamento adimensional obtida através da equação ($\tau y' = \tau y' / \rho g H$), H é a altura da amostra, ρ é a massa específica do fluido e g é a aceleração da gravidade.

Tabela 1. Características físicas e químicas do rejeito

Densidade	Principais espécies químicas	d_{50}	d_{90}	%<20 μ m
2,82 g/cm ³ $\sigma = 0,0152$	SiO ₂ = 72,97%; Fe ₂ O ₃ =17,94%; Al ₂ O ₃ = 8,00%	38,1 μ m	75,2 μ m	24,4%

2.3 Teste de sedimentação

Além da interferência que os flocculantes proporcionam na reologia das polpas de rejeito, é importante avaliar a capacidade desses reagentes em garantir menor tempo na sedimentação do material, garantindo maior eficiência do processo, além de gerar clarificados com a possibilidade de reuso.

Para avaliar o desempenho da sedimentação do rejeito, foram realizados ensaios de sedimentação descontínua em bancada, utilizando uma proveta de 1000 ml, seguindo a metodologia proposta por França e Casqueira [10]. Foram realizados ensaios sem a adição de flocculantes, e um planejamento fatorial 2² foi elaborado (ver Tabela 3) para avaliar a sedimentação na presença dos reagentes.

Os ensaios foram realizados com a polpa em seu pH natural, aproximadamente 6,5. O pH não foi alterado nestes ensaios, pois o material avaliado é um rejeito, e a modificação do pH implica em gastos financeiros. Após adição dos flocculantes, a polpa com percentual mássico de sólidos de 20 foi homogeneizada na proveta, utilizando agitador manual, por 6 bateladas. A altura da interface de clarificação da polpa foi registrada em intervalos de tempo previamente estabelecidos, sendo a última aferição realizada após uma hora do início do teste. Ao final do teste, uma alíquota do líquido sobrenadante na proveta, retirada 15 cm abaixo da superfície, era transferida com o auxílio de uma pipeta para o turbidímetro da marca Hanna, modelo HI93703C.

Tabela 2. Planejamento experimental *slump test*

Fator	Níveis
Tipo de reagente	sem reagente Magnafof 351 Alclar 662
% sólidos na polpa	70 72 75

Tabela 3. Planejamento experimental dos ensaios de sedimentação

Fator	Níveis
Tipo de reagente	Magnafof 351; Alclar 662
Dosagem (g/t)	20; 120

As respostas avaliadas foram a turbidez do clarificado, a velocidade de sedimentação, obtida a partir da curva de sedimentação e o percentual mássico de sólidos no *underflow* (%s), obtido a partir das Equações 2, 3 e 4, considerando-se que toda a fração de sólidos vai para o *underflow*. Sendo que V_u , V_a e V_s são o volume de *underflow*, de água e de sólidos, respectivamente, h é altura do *underflow* e r o raio da proveta.

$$V_u = \pi \cdot r^2 \cdot h \tag{2}$$

$$V_a = V_u - V_s \tag{3}$$

$$\%s = \frac{m \text{ sólidos.}}{(m \text{ água} + m \text{ sólidos})} * 100 \tag{4}$$

3 Resultados e discussão

Os resultados da caracterização do rejeito, apresentados na Tabela 1, apontam que os principais componentes do rejeito são quartzo e hematita, resultados semelhantes a estes também foram encontrados para o rejeito de ferro estudado por Trampus e França [11]. Ademais, o rejeito foi considerado fino, logo que apresenta um $d_{90} = 75,23 \mu\text{m}$, outra informação relevante observada é que 24,83% da amostra possui granulometria inferior a 20 μm , mostrando que este rejeito é favorável para a formação de pasta, levando em consideração que Barreda e Valadão [4] sugerem que as pastas minerais apresentam ao menos 15% de material de granulometria abaixo de 20 μm .

3.1 Reologia das polpas de rejeito

Os ensaios preliminares de *slump test* mostraram que, mesmo na presença dos reagentes, polpas com concentrações de sólidos inferiores a 70% apresentaram abatimento de 100%, ou seja, a tensão de escoamento é nula, como ilustrado na Figura 1. O abatimento pôde ser medido apenas para as polpas com concentração acima de 70% e no máximo 75% de sólidos. Sendo assim, os ensaios foram realizados variando o percentual de sólidos da polpa em 70%, 72% e 75%.

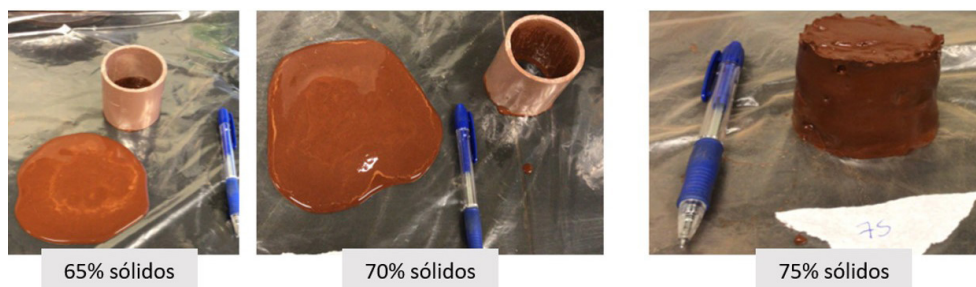


Figura 1. *Slump test* para diferentes % de sólido.

Os resultados para a média das tensões de escoamento estão apresentados graficamente na Figura 2, onde é possível observar que em todos os testes, o aumento do percentual de sólidos na polpa promoveu o aumento da tensão de escoamento. Jarvisa et al. [12] apontam que uma diminuição na quantidade de partículas na polpa ocasiona uma diminuição na resistência do floco, o que interfere diretamente na tensão de escoamento. Pode-se perceber ainda, observando a Figura 2, que o flocculante Magnafloc 351 proporcionou tensão de escoamento superior a outra poliacrilamida analisada.

O efeito da adição dos flocculantes na reologia da polpa do rejeito foi avaliado nos testes *slump* do planejamento experimental, detalhado na Tabela 2. Observou-se que tanto o percentual de sólidos da polpa quanto o tipo de

reagente interferiram na tensão de escoamento, sendo que o percentual de sólidos apresentou maior responsabilidade nessa resposta, assim como mostra o Gráfico de Pareto, exibido na Figura 3. Cabe ressaltar que as barras apresentadas nos gráficos para os fatores significativos se encontram a direita da linha tracejada. O modelo ajustado apresentou um $R^2=99,85\%$, valores de R^2 (coeficiente de determinação de Pearson) próximos a 100%, mostram que o modelo estatístico apresenta alto índice de adequação nos valores fornecidos pelo programa, apontando que os resultados são, estatisticamente bem fundamentados. Outro fato importante é que para as concentrações de sólido acima de 72% a tensão de escoamento está acima de 40 Pa, caracterizando o material como polpa de rejeito de alta densidade de acordo com MEND [13].

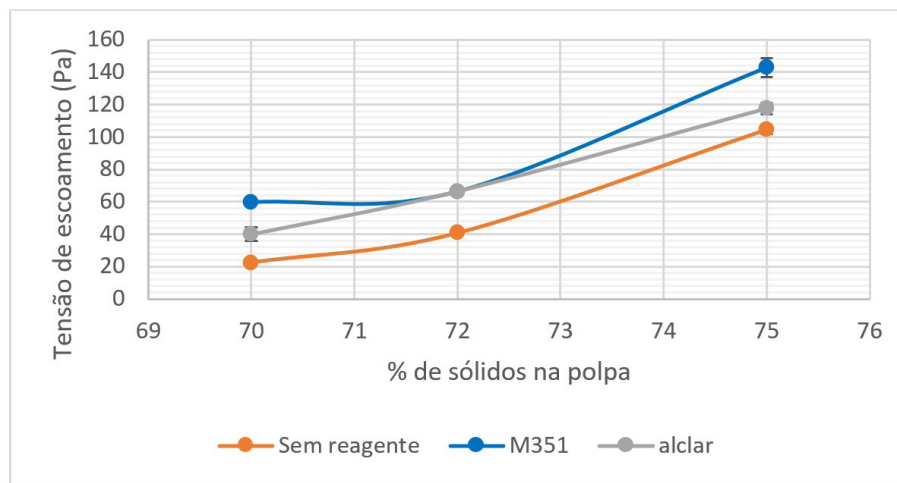


Figura 2. Tensão de escoamento em função do % de sólidos na polpa.

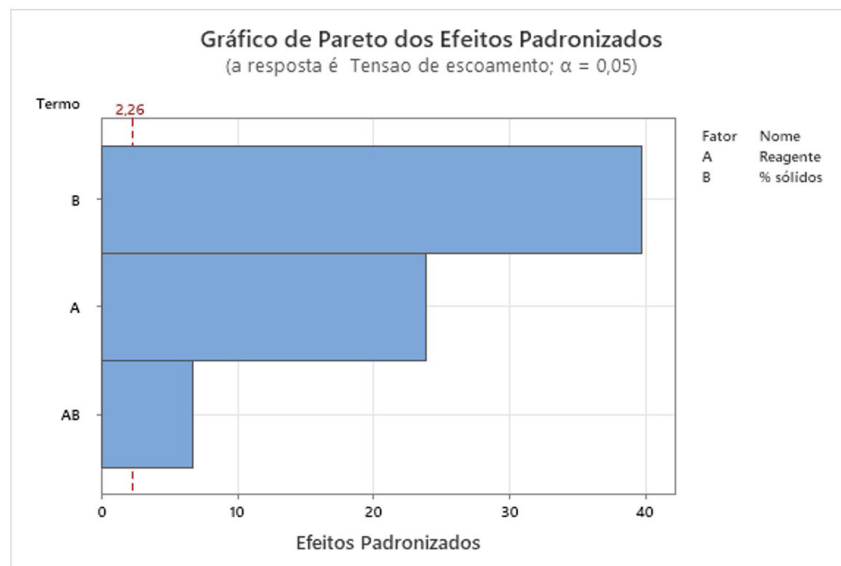


Figura 3. Gráfico de pareto dos efeitos padronizados.

3.1 Ensaios de sedimentação

Inicialmente realizou-se os ensaios sem adição de reagentes, com a polpa em seu pH natural (aproximadamente 6,5). Nestes ensaios não foi possível observar interface do clarificado, impossibilitando a quantificação da velocidade de sedimentação. A dificuldade da sedimentação do rejeito sem adição de reagente pode ser causada pelas partículas finas que, segundo Baltar [14], dificultam o processo de sedimentação. Após 24 horas foi possível observar a interface clarificado-*underflow*, de onde se obteve que o percentual de sólidos no material sedimentado foi de 58,9%, enquanto a turbidez média do clarificado foi de 302,5 NTU.

A Figura 4 apresenta graficamente a média das velocidades de sedimentação obtidas nos ensaios do planejamento experimental. O reagente Magnafloc 351 promoveu maior velocidade de sedimentação quando comparado ao Alclar. O modelo do planejamento exibiu um R² de 96,7%, mostrando-se bastante confiável, e ao nível de significância de 5%, a dosagem e o tipo de reagente tiveram influência

significativa na velocidade de sedimentação, conforme apresenta a Figura 5, contribuindo com 58,22% e 28,63%, respectivamente, para variabilidade na resposta.

A turbidez média dos clarificados obtidos nos ensaios do planejamento está apresentada graficamente na Figura 6. Percebe-se que o reagente que proporcionou menores valores para a turbidez do clarificado foi o Magnafloc 351, em todas as dosagens os clarificados apresentaram turbidez < 100 NTU, atendendo a resolução nº357 do CONAMA para a classe 1 e 2 de reuso de água, que pode ser utilizada, por exemplo, para navegação e harmonia paisagística [15]. Este mesmo reagente também foi o que proporcionou maior valor de tensão de escoamento da polpa, dentro das faixas avaliadas nos testes de abatimento. Observa-se também que para a maior dosagem do flocculante Alclar tem-se um maior valor médio da turbidez do clarificado. Este fato também foi observado por Trampus e França [11] para um rejeito de minério de ferro, os autores observaram que quando mudou a dosagem dos flocculantes aniônicos de 30 para 60 g/t, obtiveram-se valores mais elevados para a turbidez.

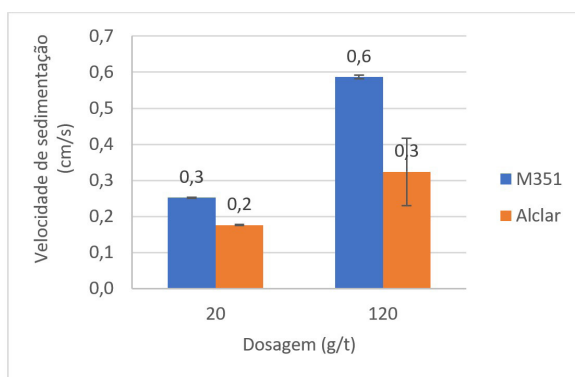


Figura 4. Médias das velocidades de sedimentação.

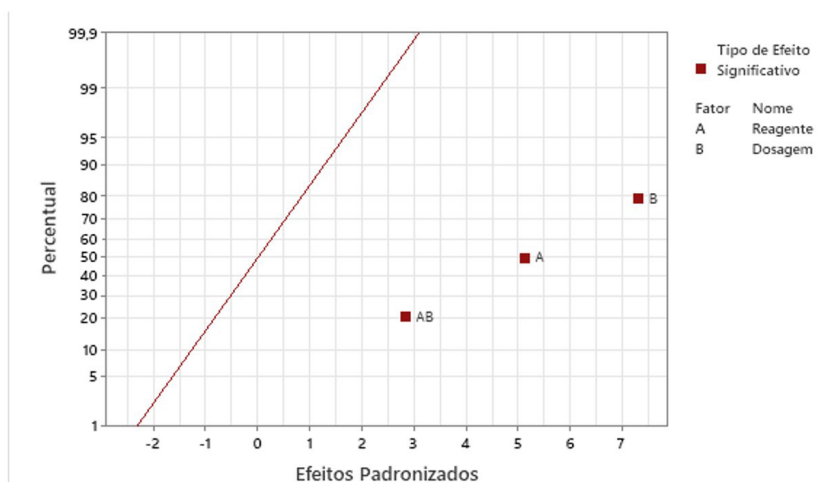


Figura 5. Gráfico normal dos efeitos padronizados para a velocidade de sedimentação.

A elevada densidade de carga aniônica promove o aumento da repulsão eletrostática entre as partículas finas, aumentando a dispersão da polpa e promovendo maiores valores para a turbidez do clarificado [14].

O modelo fornecido pelo planejamento possui um R^2 de 85,4% e aponta que, ao nível de significância de 5%, a interação entre o tipo de reagente e a dosagem foi significativa para a resposta. Na Figura 7 está apresentado o gráfico de Pareto onde é possível observar a influência de cada variável nas respostas, turbidez e percentual de sólidos no *underflow*. Cabe ressaltar que as barras apresentadas nos gráficos para os fatores significativos, se encontram a direita da linha tracejada.

Os resultados médios para o percentual de sólidos no *underflow* obtido nos ensaios estão apresentados na Figura 8. Observa-se que o aumento da dosagem apresenta uma tendência para diminuição do percentual de sólidos no *underflow*. O tamanho do floco formado interfere nesse percentual de sólidos, logo que, flocos grandes tem a capacidade de armazenar água em seu interior. Na Figura 9 é possível observar a variação no tamanho dos flocos com a mudança na dosagem do reagente, com maior dosagem observou-se a formação de flocos maiores. O modelo estatístico forneceu um valor de R^2 de 99,39% e apontou que a dosagem e o tipo de reagente influenciam no tamanho do floco ao nível de 5% de confiança.

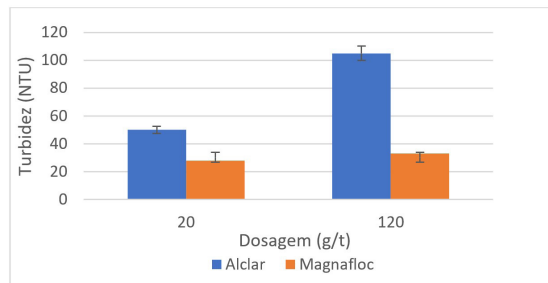


Figura 6. Resultado das médias da Turbidez do clarificado.

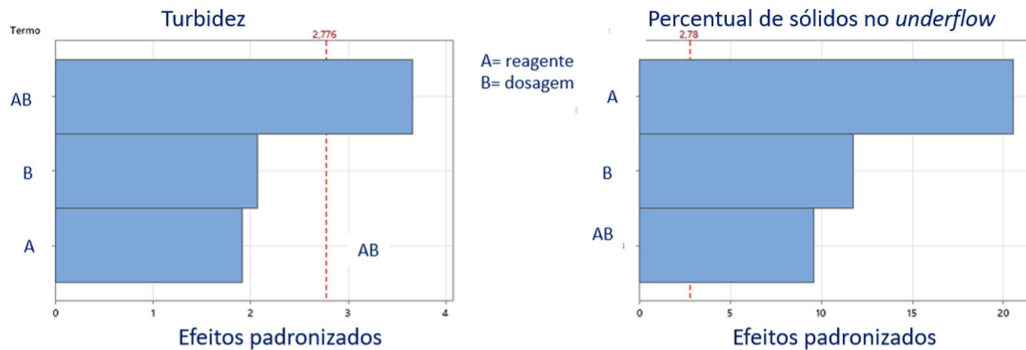


Figura 7. Gráfico de Pareto para a Turbidez e percentual de sólidos no *underflow*.

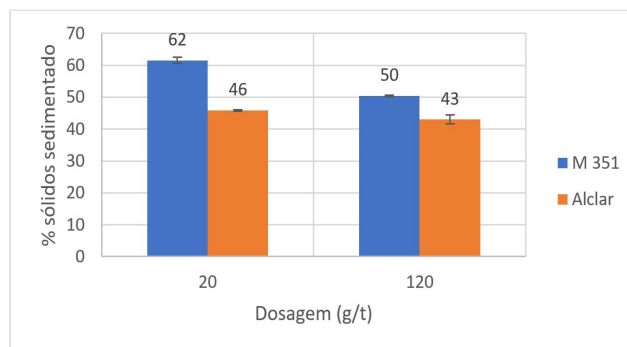


Figura 8. Média dos resultados de % de sólidos no *underflow*.

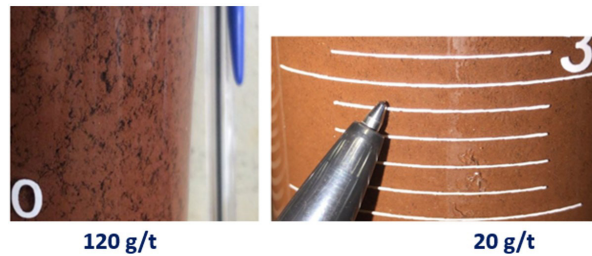


Figura 9. Diferença de tamanho dos flocos com a dosagem do reagente Magnafloc 351.

A adição de flocculantes na polpa modificou os parâmetros reológicos e de sedimentação, indicando que os reagentes interagiram com a superfície do rejeito. Baltar [16] aponta que a adsorção das poliacrilamidas, como as analisadas neste estudo, pode ocorrer através de mecanismos distintos, predominantemente por ligações de hidrogênio, interação química por intermédio da carboxila presente na poliacrilamida aniônica e interações hidrofóbicas, através da cadeia hidrocarbônica do reagente.

4 Conclusão

Os estudos efetuados neste trabalho levam a considerar que polpas com maior percentual de sólidos possuem maior tensão de escoamento, levando a crer que a coesão do sedimento aumenta com o desaguamento.

Observou-se também que acima de 72% de sólidos o material analisado é considerado rejeito de alta densidade, pois apresenta tensão de escoamento maior que 40 Pa, que é a tensão especificada.

Os polímeros avaliados interferiram nos resultados reológicos das polpas, sendo que o Magnafloc 351 foi capaz de proporcionar maior tensão de escoamento para o material. Contudo em nenhuma das condições avaliadas o material apresentou característica de pasta, pois não foi atingida a tensão mínima de escoamento de 200 Pa. Com os ensaios de sedimentação em proveta observou-se que os reagentes flocculantes foram capazes de produzir líquidos clarificados com valores de turbidez abaixo do especificado para reuso, ao contrário da sedimentação sem uso de reagente que apresentou turbidez aproximadamente 10 vezes maior do que com o uso do Magnafloc 351 na dosagem de 120 g/t.

Referências

- 1 Mrejen M, Perelman J, Machado DC. Environmental disasters and birth outcomes: Impact of a tailings dam breakage in Brazil. *Social Science & Medicine*. 2020;250:112868.
- 2 Owen JR, Kemp D, Lèbre É, Svobodova K, Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2020;42:101361.
- 3 Fitton TG, Roshdih A. Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies. In: Jewell R, Fourie AB, Caldwell J, Pimenta J, editors. *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings; 2013; Perth*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2013. p. 275-288.
- 4 Barreda RHO, Valadão GES. Caracterização de pastas minerais produzidas com lamas de rejeitos metálicos e não metálicos. *Holos*. 2020;3:1-9.
- 5 Franks DM, Boger DV, Côte CM, Mulligan DR. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*. 2011;36(2):114-122.
- 6 Boger DV. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2013;4(1):239-257.
- 7 Boger DV. *Paste and Thickened Tailings - A Guide*. Third edition. Perth, WA: 2015, Cap 3, p. 21-43.
- 8 Parsapour GA, Hossininasab M, Yahyaei M, Banisi S. Effect of settling test procedure on sizing thickeners. *Separation and Purification Technology*. 2014;122:87-95.
- 9 Pashias N, Boger DV, Summers J, Glenister DJ. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. *Journal of Rheology (New York, N.Y.)*. 1996:1179-1189.
- 10 França SCA, Casqueira A. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM-MCT; 2007.

- 11 Trampus BC, França SCA. Estudo da agregação de partículas de rejeito de minério de ferro visando a melhoria do desaguamento. In: Anais do XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios; 2019 Nov 4-8; Belo Horizonte, Brazil. CETEM; 2019. p. 1-8
- 12 Jarvisa P, Jeffersona B, Gregoryb J, Parsons SA. A review of flocc strength and breakage. *Water Research*. 2005;39:3121-3137.
- 13 Mine environmental Neutral Drainage (MEND) Project. Study of tailings management technologies. MEND Report 2.50.1. Vancouver: Klohn Crippen Berger; 2017.
- 14 Baltar CAM. Agregação na separação sólido líquido. In: Luz AB, Sampaio JA, França SCA, editores. Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC; 2018. Cap. 12, p. 513-545.
- 15 Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União. 2005.
- 16 Baltar CAM. Flotação: em nova abordagem. Recife: UFPE; 2021. 537 p.

Recebido em: 26 Out. 2022

Aceito em: 9 Fev. 2024