

ESPESSAMENTO DO REJEITO DE MINERIO DE FERRO: EFEITO DA ASSOCIAÇÃO DOS PROCESSOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO SOBRE O REJEITO ADENSADO E LÍQUIDO CLARIFICADO

Bruna Camara Trampus (*), Silvia Cristina Alves França, Caio Philippe Carvalho Moura

* Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE e Centro de Tecnologia Mineral – CETEM;
bruna.trampus@gmail.com

RESUMO

A disposição segura de rejeitos minerais é um grande desafio da atividade mineral rumo à maior sustentabilidade. O objetivo do trabalho foi estudar o desaguamento do rejeito do beneficiamento de minério de ferro com o intuito de melhorar a eficiência das operações de separação sólido-líquido, como a agregação e espessamento, e consequentemente, a estabilidade para disposição em barragens de rejeitos. Para tanto, fez-se uso do polímero Magnafloc 5250 como floculante, variando a dosagem até 120 g/t e, com e sem etapas de coagulação com $Al_2(SO_4)_3$. A eficiência da separação sólido-líquido foi analisada por meio das medidas de velocidade de sedimentação e turbidez do sobrenadante, e a consistência do sedimento por ensaios reológicos com a geometria Vane e slump test, a fim de obter informações sobre tensão limite de escoamento e percentagem de abatimento do rejeito adensado. Os resultados mostram que o polímero é eficiente na agregação/sedimentação das partículas, produzindo rejeitos espessados com $\tau_0 = 600$ Pa.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos espessados, Minério de ferro, Desaguamento, Tensão limite de escoamento, Disposição de rejeitos.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro. Em 2019, os minerais metálicos responderam por 80% da produção mineral brasileira, com expressiva participação do ferro (72,8%), sendo a produção nacional bruta de 510×10^6 t de minério de ferro, e 397×10^6 t do beneficiado, e representou a maior produção mineral nacional nos últimos anos (ANM, 2020; IBRAM, 2019).

O minério de ferro tem extrema importância na indústria mineral brasileira, apresentando impacto relevante na economia nacional. Contudo, a mineração pode gerar impactos sociais e ambientais negativos, principalmente com relação à disposição dos rejeitos, como os desastres que ocorreram nas barragens de minério de ferro em Mariana e Brumadinho, Minas Gerais em 2015 e 2019, respectivamente. O gerenciamento dos rejeitos minerais necessita de uma gestão ambiental cuidadosa, pois detêm como um dos maiores problemas o alto volume de água nas barragens convencionais. Assim, um descarte adequado de rejeitos deve considerar idealmente a minimização da água, a qual deverá ser recirculada para algumas etapas do beneficiamento.

Para aumentar a eficiência dos processos de separação sólido-líquido e melhorar a eficácia do desaguamento, visando não somente a fase sólida, mas também a recuperação de água de processo, há necessidade de técnicas de agregação de partículas, como a coagulação e a floculação. Diversas variáveis como pH da polpa, reagentes utilizados, distribuição granulométrica e percentagem de sólidos influenciam na agregação das partículas e formação dos flocos, e por consequência na separação sólido-líquido. O pH afeta a carga superficial das partículas sólidas, a ionização do polímero utilizado, e consequentemente, as forças atrativas ou repulsivas para aglomeração das partículas (BALTAR, 2018; CHEN et al., 2003). A granulometria interfere diretamente na sedimentação, pois a velocidade de sedimentação é função direta do diâmetro da partícula, assim a presença de partículas de granulometria fina e coloidais dificulta o processo de separação sólido-líquido (BALTAR, 2018). O tipo de polímero utilizado como floculante influencia na interação polímero-partícula, e as características do polímero, na densidade dos flocos formados, ou seja, maior ou menor quantidade de água intraflocular, com influência direta na sedimentação (BALTAR, 2018; CHEN et al., 2003; GREGORY e BARANY, 2011).

A reologia é uma ferramenta essencial para avaliar a produção de rejeitos espessados. Os fatores químicos, físicos e interfaciais influenciam na formação dos flocos e, por consequência, nas propriedades reológicas dos sedimentos, como viscosidade e a tensão limite de escoamento (τ_0) (SOFRÁ e BOGER, 2011). Portanto, tais fatores são cada vez mais explorados para potencializar a produção de sedimentos espessados e pastosos

OBJETIVO

Estudar o desaguamento do rejeito de minério de ferro, por meio da caracterização reológica dos sedimentos formados após floculação/sedimentação, visando obter máxima taxa de sedimentação e mínima turbidez do sobrenadante, a fim de maximizar os benefícios ambientais com o reuso de água industrial e disposição de rejeitos adensados/pastosos, como a redução da probabilidade de acidentes envolvendo falhas nas barragens convencionais.

METODOLOGIA

MATERIAIS

O rejeito mineral é proveniente de uma usina de beneficiamento de minério de ferro, localizada no estado de Minas Gerais - Brasil. A polpa do rejeito de minério de ferro foi submetida a ensaios de floculação/sedimentação, utilizando como floculante o polímero Magnafloc 5250, fabricado pela Basf. Utilizou-se sulfato de alumínio, $Al_2(SO_4)_3$, como coagulante, a fim de reduzir a turbidez do sobrenadante após sedimentação.

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A polpa do rejeito de minério de ferro foi caracterizada em termos de concentração inicial de sólidos (C_0), pH, distribuição granulométrica e densidade de carga superficial. A análise granulométrica do rejeito foi realizada por peneiramento a úmido em série de peneiras Tyler, e por espalhamento de luz no equipamento Mastersize 2000 – Malvern. As densidades de carga superficial do rejeito e do polímero foram determinadas no equipamento Zetasizer nano series – Malvern.

SEDIMENTAÇÃO DESCONTÍNUA

As polpas foram floculadas em equipamento jar test (modelo Nova Ética 218-6) de acordo com o planejamento de experimentos apresentado na Tabela 1, com triplicata no ponto central. A solução polimérica foi adicionada à polpa em suspensão, sob agitação de 300 rpm por 1 min, seguida por agitação lenta, a 150 rpm, por 2 min, para promover a mistura adequada e crescimento dos flocos, respectivamente. Em termos do número de adimensional de Camp, $C_1 = 33.000$ e $C_2 = 21.600$, respectivamente.

Tabela 1. Plano experimental fatorial completo a cinco níveis e uma variável.

NÍVEIS	DOSAGEM DE POLÍMERO (g/t)
-2	0
-1	30
0	60
+1	90
+2	120

O estudo da velocidade de sedimentação (V_{sed}) foi realizado em um espessador de pastas. Para tanto, após a etapa de floculação no jar test, 4 L de polpa floculada foram transferidas para o espessador permitindo medições de altura da interface sólido-líquido em relação ao tempo. O espessador é composto por um tubo de acrílico ($H = 1$ m e $D_{in} = 8,4$ cm), com oito pontos de amostragem distribuídos uniformemente ao longo do tubo, e um cone com angulação de 45° , para facilitar a remoção do rejeito espessado.

O ensaio foi realizado durante 5h, e nos tempos de 1h e 3h, três alíquotas do sobrenadante foram coletadas e analisadas em termos de pH, turbidez e condutividade, em phmetro Digimed DM-22, turbidímetro Hach modelo 2100P e condutímetro MS Tecnopon mCA-150, respectivamente. Visando menores valores de turbidez do sobrenadante, ajustou-se o pH para a faixa de 10 – 11 com a adição de cal e utilizou-se sulfato de alumínio, $Al_2(SO_4)_3$, na concentração de 0,2 g/L, como coagulante.

CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS ESPESSADOS

Ao término da etapa de sedimentação, o underflow foi coletado para análise de consistência segundo ensaios de abatimento slump test e reológicos. O teste de abatimento é utilizado para determinar a consistência de polpas minerais (BOGER, 2009; CLAYTON; GRICE e BOGER, 2003; TRAMPUS e FRANÇA, 2019). O procedimento experimental adotado para determinação do percentual de abatimento (%ABT) é o mesmo relatado por Trampus e França (2019).

A τ_0 foi determinada utilizando-se o reômetro RheoStress 1 da Haake, e o rotor vane. A metodologia experimental foi baseada nos estudos de Boger (2009, 2013) e Sofrá e Boger (2011), os quais relatam que a utilização do rotor Vane para determinação da τ_0 é aplicável às polpas minerais, pois minimiza os efeitos de sedimentação e deslizamento. Nesse estudo, a τ_0 foi obtida por duas técnicas: método direto, impondo-se uma baixa rotação constante, e por regressão, com base nos dados da curva de fluxo. O ajuste dos dados da curva de fluxo foi realizado pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 1). No procedimento experimental, primeiramente, a τ_0 do sedimento foi analisada aplicando uma deformação constante de 1 rpm por 300 s, sendo referida como τ_0 estática. Após isso, o sedimento foi submetido a uma taxa de cisalhamento constante de 100 s^{-1} , por um período de 300 s, a fim de destruir a estrutura dos flocos e liberar a água contida. Esse sedimento tem seu ponto de fluidez referido como τ_0 dinâmica, e foi analisado por duas formas distintas: a primeira igual à anterior, e posteriormente, realizou-se uma curva de fluxo variando a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 100 a $0,01 \text{ s}^{-1}$, com 10 pontos por década, e um intervalo máximo de 5 min por ponto. A concentração de sólidos dos sedimentos (C_{sed}) foi determinada com a balança de umidade Ohaus MB23.

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{Equação 1})$$

RESULTADOS

A polpa do rejeito de minério de ferro utilizada apresentou concentração inicial média de sólidos de $36,3 \pm 0,13\%$ (p/p), pH 6,5-7 e $d(0,9) = 0,027 \text{ mm}$, sendo composto majoritariamente por partículas ultrafinas. O gráfico apresentado na Figura 1 exibe os resultados de potencial zeta para o rejeito e o floculante estudados. Com relação ao rejeito, observa-se que em pH natural (pH 6,5-7) apresenta elevada densidade de carga aniônica, causando forte repulsão eletrostática entre as partículas sólidas, que em associação ao pequeno diâmetro, dificulta o processo de sedimentação natural e a separação sólido-líquido para produção dos rejeitos espessados (BALTAR, 2018). A base do polímero Magnafloc 5250 é poliacrilamida aniônica com elevado peso molecular, e conforme pode ser observado na Figura 1, na faixa de pH natural, a densidade de cargas aniônicas do polímero é superior a do rejeito. O mecanismo de agregação prioritário das partículas com o floculante estudado é por formação de pontes, o qual ocorre com polímeros de alto peso molecular e mesma carga elétrica das partículas (BALTAR, 2018; GREGORY e BARANY, 2011).

Os valores da V_{sed} para a polpa do rejeito natural (sem floculante) e após floculação são apresentados na Tabela 2. Observa-se que, em comparação à polpa sem floculante, o aumento da dosagem de polímero proporciona crescimento da V_{sed} , e mesmo a menor dosagem de polímero (30 g/t) promove quase 400% de aumento da V_{sed} . Na Figura 2 observa-se que a utilização do floculante resultou em até 92% de redução da turbidez do sobrenadante. Observa-se ainda que os resultados de V_{sed} e turbidez se reforçam, pois quanto maior a V_{sed} , menor a turbidez do sobrenadante, indicando que o polímero proporciona boa agregação das partículas. Contudo, destaca-se que para a dosagem de 120 g/t de polímero ocorreu o aumento da turbidez do sobrenadante, em comparação com a dosagem anterior, ou seja, a elevada densidade de carga aniônica promove o aumento da repulsão eletrostática entre as partículas finas, prejudicando a clarificação do sobrenadante (BALTAR, 2018). Observa-se, também na Figura 2, que apesar da utilização do floculante proporcionar acentuada redução da turbidez do sobrenadante, destaca-se que em todos os casos a turbidez ficou acima de 100 NTU (unidade nefelométrica de turbidez) e condutividade na faixa de 720 a $780 \mu\text{S cm}^{-1}$. Sendo assim, em relação a condutividade, não atende ao padrão de qualidade estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para reuso/descarte da água, daí a necessidade de uma etapa adicional do tratamento do efluente. O $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ apresentou elevada eficiência na coagulação das partículas finas do sobrenadante, proporcionando valores de turbidez inferiores a 100 NTU, em todas as condições estudadas, com aumento da condutividade para a faixa de 930 a $960 \mu\text{S cm}^{-1}$.

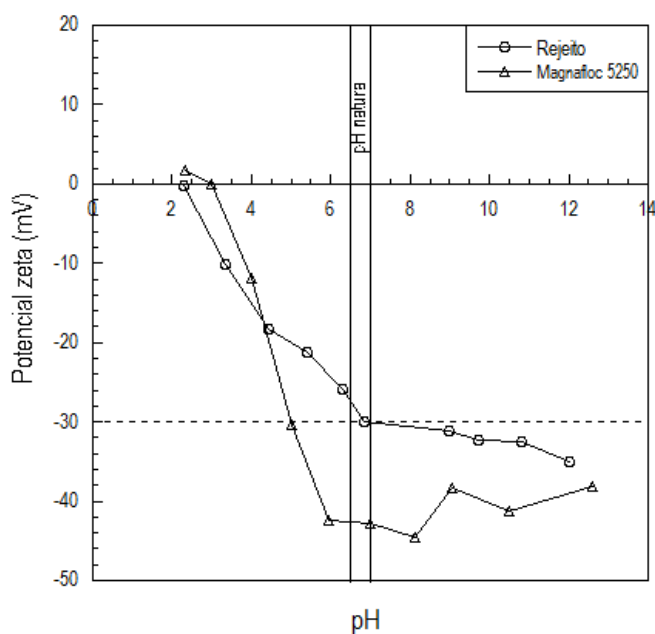


Figura 1. Potencial zeta dos materiais.

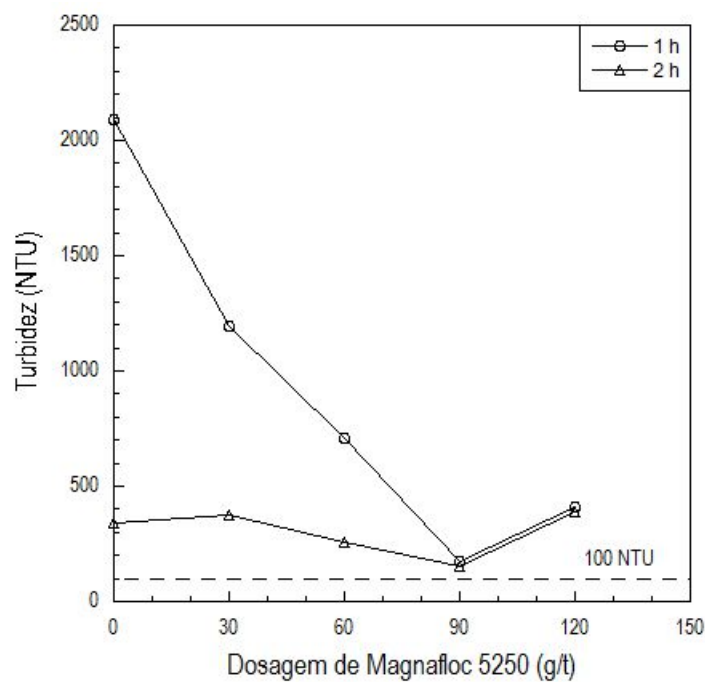


Figura 2. Turbidez após 1 e 3h de sedimentação.

Tabela 2. Plano Dados de velocidade de sedimentação.

DOSAGEM DE POLÍMERO (g/t)	V_{sed} (m/s)
0	$1,1 \times 10^{-5}$
30	$5,4 \times 10^{-5}$
60	$8,4 \times 10^{-5}$
90	$49,4 \times 10^{-5}$
120	$758,2 \times 10^{-5}$

A Figura 3 exibe o teste de sedimentação para o rejeito floculado com 120 g/t de polímero, realçando a consistência do sedimento no underflow, e, além disso, exibe o teste de abatimento nesse ponto experimental. Com relação aos ensaios reológicos, a Figura 4 exibe os valores de tensão estática (pontos únicos) e dinâmica (curva fluxo) para os sedimentos floculados e espessados, evidenciando a dependência da tensão limite de escoamento, estática e dinâmica, com a dosagem do floculante (TRAMPUS e FRANÇA, 2019). É possível observar que a adição de floculante à polpa gera elevação da tensão de escoamento estática, porém os valores são similares para as dosagens de 60, 90 e 120 g/t. Os dados apresentados na Tabela 3 favorecem a avaliação da influência da adição do floculante no espessamento/consistência do rejeito. Observa-se, na Tabela 3, que o aumento da dosagem do floculante proporciona a formação de sedimentos mais consistentes, i. e., menor %ABT e maior τ_0 estática. Contudo, destaca-se que a consistência do sedimento com 60, 90 e 120 g/t do floculante são similares. Destaca-se, ainda, que essas maiores dosagens proporcionaram maior altura do sedimento no espessador, em comparação com 30 g/t, ou seja, apesar de inicialmente serem rejeitos mais consistentes, os flocos formados são maiores e com maior acúmulo de água intraflocular, gerando menores concentrações e τ_0 dinâmica, tensões de escoamento após a quebra dos flocos formados, (Figura 4).



Figura 3. Ensaio de espessamento e teste de abatimento para o rejeito de minério de ferro com 120 g/t Mag 5250.

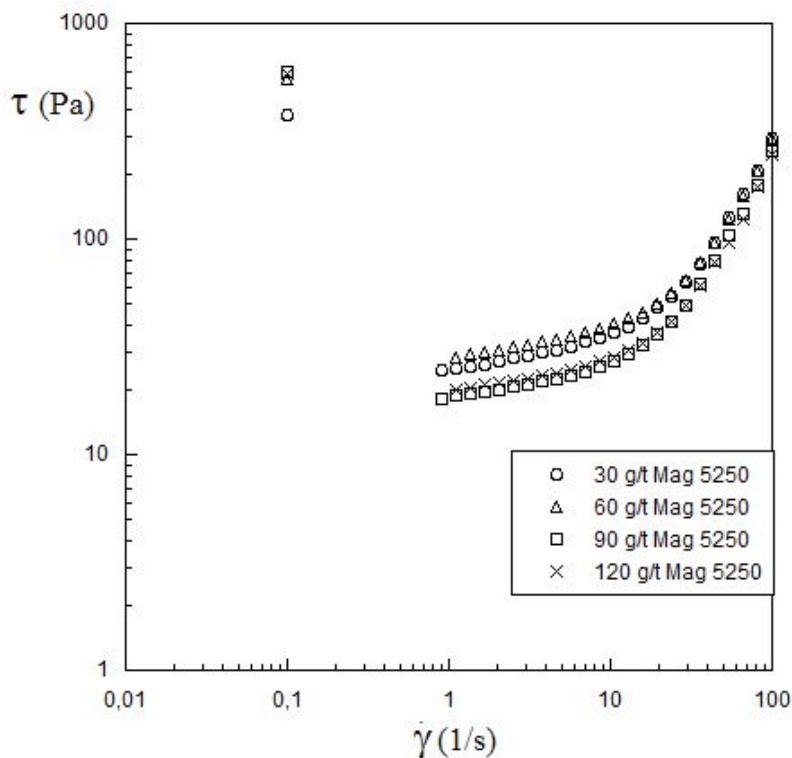


Figura 4. Curvas de escoamento dos sedimentos adensados variando a dosagem de polímero: τ_0 estática, pontos isolados, e τ_0 dinâmica, curvas de escoamento.

Tabela 3. Dados obtidos após 5h de sedimentação/compactação.

DOSAGEM DE POLÍMERO (g/t)	H _{sed} (cm)	C _{sed} (% p/p)	% ABT	τ_0 ESTÁTICA (Pa)
0	40	-	-	-
30	20,5	64,3	43,7	373
60	22,9	63	37,6	550
90	23,1	59	38,2	600
120	23,8	60	38,0	580

CONCLUSÃO

O polímero floculante utilizado apresentou elevada eficiência na agregação das partículas do rejeito de minério de ferro, promovendo aumento expressivo da V_{sed} e até 92% de redução da turbidez do sobrenadante, em comparação com a sedimentação da polpa natural. Entretanto, devido à forte repulsão eletrostática das partículas muito finas, os valores de turbidez do sobrenadante permaneceram superiores a 100 NTU, dificultando o reuso da água no processo. Os estudos mostraram que o sobrenadante pode passar por uma etapa de coagulação com $Al_2(SO_4)_3$, reduzindo a turbidez para valores abaixo de 100 NTU. Este processo se mostrou eficiente para desaguar o rejeito, formando sedimentos com $\tau_0 = 550$ Pa e reduzidos % ABT, para a dosagem de 60 g/t de floculante. Observou-se também que o aumento da dosagem de floculante para valores acima de 60 g/t não alterou as características do sedimento.

Os resultados indicam uma alternativa para o descarte do rejeito de minério de ferro, considerando o desenvolvimento sustentável das atividades de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas 2020**. Brasília: ANM, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2 Acesso em: 20 set. 2021.
2. BALTAR, CAM. Agregação na Separação Sólido-Líquido. In: LUZ, A.B. et al. (Eds). **Tratamento de Minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, 2018, p. 513-545.
3. BOGER, D.V. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, v.64, p.4525–4536, 2009.
4. BOGER, D.V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. **The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v.4, p.239-257, 2013.
5. CHEN, H.T.; RAVISHANKAR, S.A.; FARINATO, R.S. Rational polymer design for solid-liquid separations in mineral processing applications. **International Journal of Mineral Processing**, v.72, p.75-86, 2003.
6. CLAYTON, S., GRICE, T.G., BOGER, D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v.70, p.3-21, 2003.
7. CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357/05. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional**. Brasília, SEMA, 2005.
8. GREGORY, J; BARANY, S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.169, p.1–12, 2011.
9. IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Comércio Externo da Mineração Brasileira**. IBRAM, 2019. Disponível em: <<https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2019/01/comex-jan2019.pdf> > Acesso em: 20 agosto 2019.
10. SOFRÁ, F., BOGER, D.V., Rheology for thickened tailings and paste – history, state-of-the-art and future directions. **Proceedings of Paste 2011**. Perth, Australia, 2011. p.121-133, 2011.
11. TRAMPUS, B.C., FRANÇA, S.C.A. Rheology applied to the environmental management of mineral tailings: focus on safer disposal and water reuse. **REM, Int. Eng. J.**, v.72(2), p.301-306, 2019.