

Reologia aplicada ao desaguamento de polpas minerais para a produção de rejeitos espessados e pastosos

Rheology applied to dewatering of mineral pulps to thickened tailings and paste production

Bruna Camara Trampus
Bolsista PCI, Eng^a. Química, M.Sc.

Sílvia Cristina Alves França
Supervisora, Eng^a. Química, D.Sc

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 conseqüentemente, 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.

Abstract

Safe disposal of mineral tailings is a major challenge of mining activity towards greater sustainability. The objective of this work was to study the iron ore tailings, with the purpose of promoting greater efficiency in solid-liquid separation operations, aiming a safe and stable tailing disposal. For this, it was used the polymer Magafloc 5250 with flocculant, with dosages up to 120 g/t, with and without previous coagulation with $Al_2(SO_4)_3$. The solid-liquid separation efficiency was analyzed by measurements of settling rate and turbidity of the overflow, and the sediment consistency by rheological tests with the vane rotor and slump test, in order to obtain information about yield stress and slump height of the thickened tailings. The results show that the polymer is efficient in particles aggregation/sedimentation, producing thickened tailings with $\tau_0 = 600$ Pa.

Key words: thickened tailings, iron ore, dewatering, yield stress, tailings disposal.

1. Introdução

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro. Em 2017, os minerais metálicos responderam por 80% da produção mineral brasileira, com expressiva participação do ferro, sendo a produção nacional bruta de 585×10^6 t de minério de ferro, e 450×10^6 t do beneficiado, e representou a maior produção mineral nacional nos últimos anos (ANM, 2019; 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 porcentagem 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 conseqüentemente, 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, 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.

2. 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.

3. Material e Métodos

3.1. 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.

3.2. 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, na faixa de pH de 2 a 12, ajustado com soluções de KOH e HCl, e em eletrólito indiferente, KCl (0,01 M).

3.3. 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 para a determinação do erro experimental. 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.

	- 2	- 1	0	+ 1	+ 2
Dosagem de polímero (g/t)	0	30	60	90	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 oitos 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 condutivímetro 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.

3.4. 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), utilizando-se um cilindro em PVC, com $H = D_{in} = 2$ in.

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. No método direto, a tensão é avaliada em função do tempo, atingindo um valor de máximo, que é quando o material escoar, correspondendo a τ_0 . O ajuste dos dados da curva de fluxo foi realizado pelo modelo de Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$). 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.

4. Resultados e Discussão

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 $d(0,9) = 0,027$ mm, sendo composto majoritariamente por partículas ultrafinas. O gráfico apresentado na Figura 1-A 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 poliácridamida aniônica com elevado peso molecular, e conforme pode ser observado na Figura 1-A, 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 1-B 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 1, 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 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

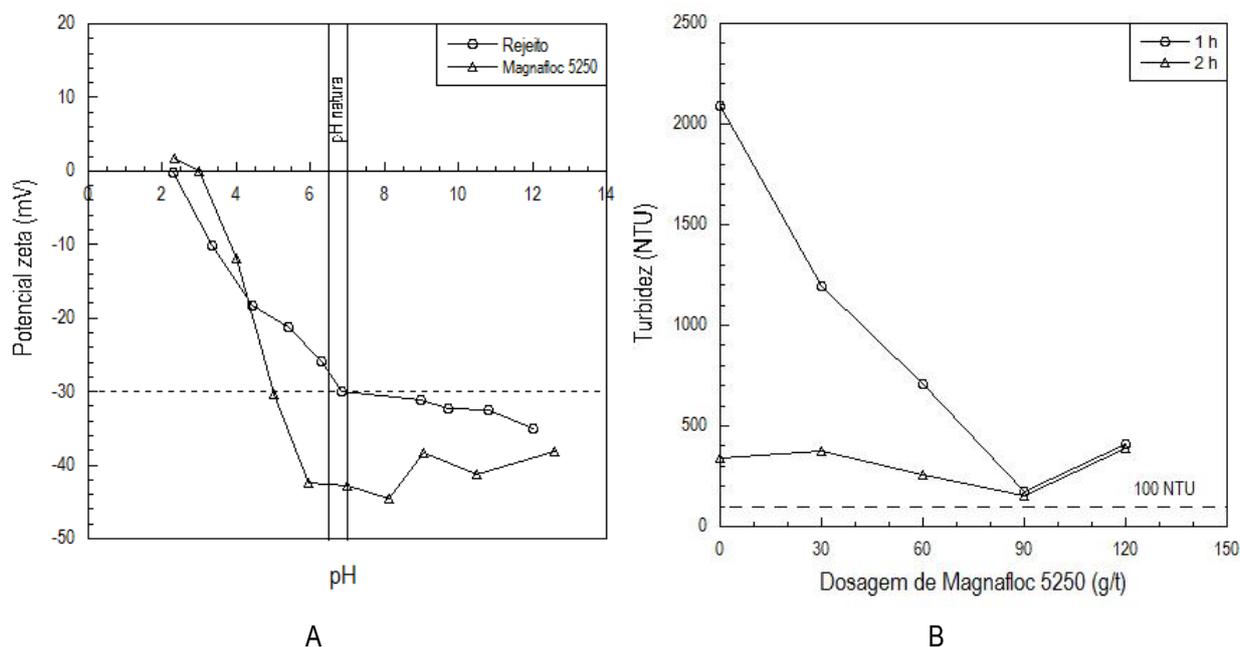


Figura 1. (A) potencial zeta dos materiais; (B) Turbidez após 1 e 3h de sedimentação.

Tabela 2. Dados de velocidade de sedimentação.

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

A Figura 2-A 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, expõe a ilustração do teste de abatimento nesse ponto experimental. Com relação aos ensaios reológicos, a Figura 2-B 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 favorece a avaliação da influencia 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 acumulo de água intraflocular, gerando menores concentrações e τ_0 dinâmica, tensões de escoamento após a quebra dos flocos formados, (Figura 2-B).

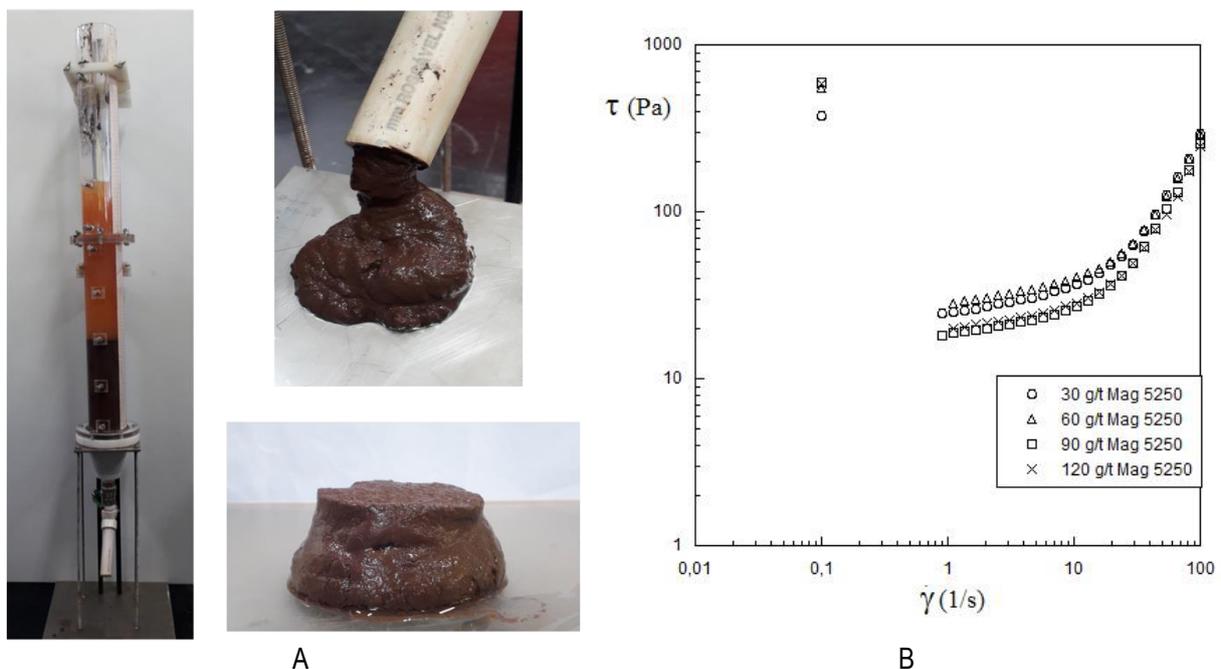


Figura 2. Ensaio com o rejeito de minério de ferro. (A) Espessamento e teste de abatimento (120 g/t Mag 5250); (B) τ_0 estática, pontos isolados, e τ_0 dinâmica, curvas de escoamento, variando a dosagem de polímero.

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

Dosagem do floculante (g/t)	0	30	60	90	120
H_{sed} (cm)	40	20,5	22,9	23,1	23,8
C_{sed} (% p/p)	-	64,3	63	59	60
%ABT	-	43,7	37,6	38,2	38,0
τ_0 estática (Pa)	-	373	550	600	580

5. 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.

6. Agradecimento

Ao CNPq pela bolsa concedida através do Programa PCI/CETEM/MCTI, à supervisora Sílvia França, aos companheiros de laboratório, à empresa BASF pela amostra de floculante e ao CETEM pela infraestrutura.

7. Referências Bibliográficas

- ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: http://www.anm.gov.br/dnmp/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf Acesso em: 10 set. 2019.
- 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.
- BOGER, D.V. Rheology and the resource industries. **Chemical Engineering Science**, v.64, p.4525–4536, 2009.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- GREGORY, J; BARANY, S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.169, p.1–12, 2011.
- 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.
- 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.
- 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.