

MINERAÇÃO E SUSTENTABILIDADE: TRATAMENTO DE REJEITOS DE COBRE UTILIZANDO NOVOS BIOPOLÍMEROS AVANÇADOS

RAYANE COSTA MENDONÇA ALT
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ALANA ALMEIDA DA COSTA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ROSANA LOPES LIMA FIALHO

LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO

REINALDO GIUDICI

Introdução

A relação entre mineração e meio ambiente é um tema bastante discutido. Inúmeros são os aspectos críticos relacionados à extração mineral, como o consumo de água e de energia, assim como a geração de rejeitos provenientes do processo de beneficiamento mineral. Desta forma, as empresas de mineração têm buscado alternativas para tratamento e destinação dos rejeitos. Este trabalho dar ênfase particularmente aos rejeitos de cobre de uma mineradora brasileira, utilizando biopolímeros avançados como floculantes, que são mais eficientes e sustentáveis quando comparados com os polímeros comerciais.

Problema de Pesquisa e Objetivo

A extração e beneficiamento mineral consome uma grande quantidade de água em todos os seus processos de separação físico-química, visando extrair o máximo de minerais com valor comercial. A floculação pode ser um processo promissor para desaguamento e consolidação de rejeitos minerais. Entretanto, os polímeros comerciais costumam ser danosos ao meio ambiente e pouco eficientes. O objetivo desse estudo é comparar polímeros comerciais e novos biopolímeros, visando identificar uma melhor separação sólido-líquido, além de viabilizar produtos mais sustentáveis no tratamento de rejeitos de cobre.

Fundamentação Teórica

A floculação é um método que tem se mostrado promissor no tratamento de rejeitos da mineração, gerando a sedimentação por gravidade e promovendo a separação entre as fases sólida e líquida. O uso de polímeros para tratamento de rejeitos por meio da floculação é um método que ocorre com a interação polímero-partícula que possuem afinidade química entre eles. A maior parte dos rejeitos minerais são tratados com poliácridamida, que impacta o meio ambiente e pode afetar a saúde humana. Biopolímeros avançados representam alternativas mais sustentáveis em comparação às utilizadas convencionalmente.

Metodologia

Este subprojeto propõe o emprego de biopolímeros avançados com capacidade de floculação seletiva dos componentes minerais presentes em polpas e lamas de barragens. Os estudos serão conduzidos com amostras reais fornecidas por empresas parceiras, que após secagem, peneiramento e caracterização físico-química completa, serão submetidas a testes de floculação na presença de polímeros comerciais e biopolímeros já projetados para tratamento de rejeitos de ferro e areia betuminosa proveniente da extração de petróleo no Canadá.

Análise dos Resultados

Este trabalho encontra-se na fase inicial das atividades laboratoriais, onde já foi possível (i) obter os rejeitos disponibilizados pela mineradora, (ii) iniciar o processo de secagem do rejeito e (iii) caracterizar a água produzida durante o processo de beneficiamento do cobre. Na Figura 2 é apresentado o procedimento desenvolvido para secagem do rejeito, enquanto na Tabela 1, são apresentados os resultados da análise da água obtida após espessamento e desaguamento do rejeito. Com base nas referências adotadas, floculantes AP-g-PMETAC são promissores para o tratamento de rejeitos de cobre.

Conclusão

O setor de mineração enfrenta desafios diários para destinação adequada do elevado teor de rejeito, buscando para isso tecnologias que sejam eficazes no tratamento desse passivo ambiental. A aplicação da técnica de floculação utilizando biopolímeros demonstra ser um caminho promissor para promover um tratamento mais eficiente e sustentável, que nesse trabalho são utilizados para rejeitos de cobre. Testes laboratoriais já foram iniciados e espera-se obter resultados promissores para floculação do rejeito e clarificação da água, como já tem sido testado em rejeitos de ferro e areia betuminosa.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília, 2023. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2023. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Livro Verde da Mineração do Brasil. Brasília, 2022. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/11/IBRAM_LivroVerde-digital-030123ld.pdf. Acesso em: 18 ago. 2023. ZAGO, G. Novel natural-based polymers for dewatering iron ore tailings. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Palavras Chave

Rejeitos de cobre, Biopolímeros avançados, Floculação

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP n° 159/2022) e Fundação Escola Politécnica (FEP), e a empresa mineradora que disponibilizou o rejeito para realização desse trabalho.

MINERAÇÃO E SUSTENTABILIDADE: TRATAMENTO DE REJEITOS DE COBRE UTILIZANDO NOVOS BIOPOLÍMEROS AVANÇADOS

1 INTRODUÇÃO

A relação entre mineração e meio ambiente é um tema atualmente bastante discutido. Inúmeros são os aspectos críticos relacionados à extração mineral, como o consumo de água e de energia, assim como a geração de rejeitos provenientes do processo de beneficiamento mineral. Desta forma, as empresas de mineração têm buscado alternativas para tratamento e destinação dos rejeitos reduzindo esse passivo ambiental (IBRAM, 2022). Este trabalho dar ênfase particularmente aos rejeitos de cobre de uma mineradora brasileira em uma parceria com duas universidades brasileiras e uma universidade estrangeira.

O cobre é um metal não ferroso, que possui uma diversidade de aplicações e uma alta demanda, sendo uma das principais substâncias metálicas produzidas no Brasil (ANM, 2023). O minério de cobre pode ser encontrado em mais de 150 minerais, sendo amplamente explorado pelo mundo, tendo o Brasil em décima terceira posição, correspondendo a aproximadamente 2% das reservas mundiais, sendo Pará, Goiás e Bahia os três maiores produtores (ANM, 2023).

O cobre pode ser comercializado de diversas formas e graus de purezas diferentes, apresentando variadas aplicações, se destaca pela sua excelente condutividade elétrica e térmica, sendo utilizado principalmente no setor elétrico e construção civil correspondendo a 60% do consumo mundial de cobre (ANM, 2023). Apresentando também vital importância para a tão necessária transição energética, onde o cobre é amplamente utilizado em redes de transmissão e circuitos elétricos, estimando um significativo crescimento no consumo de cobre até 2040, em aproximadamente 40% de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021).

A exploração dos minérios conciliada com os processos de beneficiamento do cobre acarreta impactos ambientais de variadas formas e níveis. Os processos metalúrgicos que envolvem o beneficiamento do cobre envolvem ações conjuntas de etapas químicas e mecânicas, que vão promover a obtenção do produto de interesse comercial (MARTIM; SANTOS, 2013). O consumo de grandes quantidades de água durante todo o processo de beneficiamento do cobre exige intensos processos, culminando em uma alta produção de rejeitos que contêm partículas ultrafinas, que, posteriormente, sem o tratamento adequado, serão depositados em barragens de rejeitos que levaram décadas para se acomodar, dificultando a recuperação das áreas ocupadas pelos rejeitos e a recuperação da água (ZAGO, 2022).

Desta forma, existe uma necessidade em utilizar tecnologias que minimizem os impactos da indústria de mineração, visando recuperar a água dos rejeitos e gerar o mínimo de resíduos, reduzindo assim, os riscos de ruptura de barragens e recuperando os locais em que os rejeitos são depositados. As tecnologias atuais se concentram em conceitos de floculação e coagulação para alcançar tais objetivos, atuando na estabilidade do sistema das partículas ultrafinas. A floculação, processo de principal interesse do presente artigo, refere-se à adição de polímeros que se ligam fisicamente às partículas, fazendo-as depositar por gravidade (SIAH, et al., 2014). No presente estudo, são comparados os polímeros comerciais comuns à base de poliácridamida aplicados comumente na indústria e novos copolímeros avançados biodegradáveis, que têm sido aplicados para tratamento de areia betuminosa e rejeitos de ferro.

2 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

O processo de beneficiamento mineral consome uma grande quantidade de água em todos os seus processos de separação físico-química, visando extrair uma quantidade máxima de minerais que irão obter um valor comercial atendendo às especificações do mercado que será

destinado (ZUQUETTE, 2015). O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) estimou que 14 das principais substâncias minerais produzidas no Brasil serão responsáveis por cerca de 11 bilhões de toneladas de rejeitos gerados no período entre 2010 e 2030, impactando diretamente o meio ambiente devido ao aumento exponencial de rejeito que requer mais espaços para serem armazenados (IPT, 2022).

Nesse contexto, o setor de mineração enfrenta desafios constantes no que diz respeito à sustentabilidade, sendo necessário estudar métodos que gerem eficiência no tratamento de tais rejeitos, reduzindo assim, os impactos causados ao meio ambiente pela atividade mineral. Um dos métodos para separar os rejeitos e clarificar a água proveniente do processo é a floculação através de polímeros. A floculação pode ser um processo promissor para desagendamento e consolidação de rejeitos minerais, pois possibilita a redução do volume produzido. Entretanto, os polímeros comerciais podem ser danosos ao meio ambiente e pouco eficientes.

A aplicação de polímeros avançados para tratamento de rejeito de cobre torna-se um método eficiente que vem sendo estudado, pois tem se mostrado como uma estratégia mais efetivo em concentrar os sólidos na polpa e realizar a separação das partículas ultrafinas presente em tais rejeitos (ZUQUETTE, 2015). Os principais floculantes utilizados comercialmente são à base de poli(acrilamida), sendo amplamente utilizados pois formam grandes agregados. No entanto, polímeros e copolímeros à base de poli(acrilamida) apresentam caráter fortemente hidrofílicos, fazendo com que ocorra uma retenção de água nos flocos e na fase sedimentada, levando a uma eficiência indesejada, além de não apresentar perfil biodegradável.

O presente estudo visa realizar a comparação entre dois polímeros comerciais à base de poli(acrilamida), floculantes de cloreto de amilopectina-g-poli[2-(metacrilóiloxi)etil trimetilamônio] (AP-g-PMETAC) e outros dois polímeros que foram desenvolvidos para tratar rejeitos de areia betuminosa proveniente da extração de petróleo no Canadá. Tais comparações visam identificar uma separação sólido-líquido mais eficiente, além de viabilizar produtos mais ecológicos no tratamento de rejeitos de cobre.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O setor de mineração é um dos mais importantes para a economia brasileira, sendo responsável por aproximadamente 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB), sendo o minério de cobre a terceira posição ocupada na produção nacional (IBRAM, 2022). Todavia, a mineração acarreta impactos intensos ao meio ambiente, devido ao alto consumo de água e de energia, desmatamento e geração alta de rejeitos (IBRAM, 2022), neste sentido, torna-se importante obter mecanismos que reduzem tais impactos. A floculação é um método que tem se mostrado promissor no tratamento de rejeitos da mineração, devido à capacidade de aglomerar flocos do rejeito, gerando a sedimentação do mesmo por gravidade, promovendo essa separação entre as fases sólida e líquida.

As operações de beneficiamento geram uma grande quantidade de rejeitos compostos por água dos processos, partículas sólidas e alguns produtos químicos. A fase sólida é composta por material particulado que possui uma separação granulométrica que varia de grãos finos e grossos (ZUQUETTE, 2015), as partículas têm se tornado cada vez mais finas pois o material tem passado por mais processos visando extrair o máximo de minério de interesse possível. As partículas presentes nos rejeitos podem ser classificadas como areia, silte ou argila, de acordo com a ISO 14688-1, partículas com tamanhos médios maiores que 63 μm são classificadas como areias, aquelas na faixa de 2 a 63 μm são classificadas como siltes e, finalmente, com tamanhos menores que 2 μm , enquadram-se na classificação de argilas (ZAGO, 2022). Estudos voltados para a área afirmam que os rejeitos enviados para barragens são compostos principalmente por partículas ultrafinas ($1 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$) e coloides ($\varnothing < 1 \mu\text{m}$).

As características físicas específicas dos rejeitos conciliada com uma composição complexa resultam em um sistema coloidal estável, na ausência de tratamento das barragens de rejeitos, tais sedimentos levam décadas para se acomodarem, dificultando assim, a recuperação das áreas que são ocupadas pelas barragens de rejeitos e da água. Quando os rejeitos são depositados em barragens, após um período, forma-se camadas devido à ação da gravidade, as partes mais densas se depositam no fundo da lagoa (principalmente partículas grossas), na parte do central encontra-se a suspensão coloidal de partículas finas com sua estabilidade máxima e na parte superior encontra-se a fração clarificada (ZAGO, 2022).

As pesquisas atuais que envolvem tratamento de rejeitos têm se concentrado principalmente nos conceitos e processos de desidratação para dar uma origem aos rejeitos espessos e recuperar a água, que é a maior parte dos rejeitos. Existem métodos físicos e químicos que podem realizar tal procedimento, os processos físicos envolvem muitas etapas, equipamentos grandes e necessitam de operadores experientes, além de altos custos operacionais. Em contrapartida, os tratamentos químicos atuam diretamente na estabilidade do sistema coloidal, sendo a coagulação e floculação os processos mais aplicados atualmente.

O processo de coagulação, baseia-se na redução da repulsão eletrostática, espécies inorgânicas neutralizam as partículas carregadas (principalmente carregadas negativamente), fazendo com que as partículas coagulem, se depositando no fundo da barragem por ação da gravidade, mesmo diante a eficiente deste processo, grandes quantidades de íons bivalentes são adicionadas para que a coagulação ocorra, gerando uma contaminação na água tratada. Em contrapartida, a floculação é um processo que envolve a adição de polímeros que se ligam fisicamente às partículas, produzindo grandes partículas, densas para assentar no fundo da barragem (SIAH; ROBINSON; FONG, 2014).

Coagulante e floculantes são adicionados aos rejeitos brutos em recipientes chamados espessadores, que consiste em tanque de grande diâmetro que promove movimento, ajudando a sedimentar as partículas, antes do descarte em barragens. São utilizados para recuperar parte da água e densificar os rejeitos, a água clarificada domina o topo do espessador e o teor de sólidos aumenta próximo ao fundo (ZAGO, 2022). A suspensão que é formada pelos rejeitos possui alta estabilidade, sendo assim, adicionado coagulantes ou floculantes no processo de espessamento, visando melhorar a limpidez da água clarificada e a eficiência do desaguamento.

As partículas finas suspensas nos rejeitos, apresentam caráter de eletricidade quando dispersas em ambiente polar, como um meio aquoso. Tal característica afeta as propriedades da suspensão, como viscosidade, estabilidade coloidal, tensões de compressão e tensão de cisalhamento. Nos sistemas coloidais, as partículas de mesmo sinal se repelem, promovendo a estabilidade, inibindo a agregação das partículas, afetando diretamente na sedimentação desses rejeitos, sendo necessário um tratamento adequado para impedir que demorem muitos anos para se assentarem.

O uso de polímeros para tratamento de rejeito de cobre por meio da floculação é um método que ocorre com a interação polímero-partícula que possuam afinidade química entre eles. A adsorção entre polímeros e partículas ocorre principalmente devido às três ligações intermoleculares: interação eletrostática, ligação de hidrogênio e ligação de íons. Logo após a absorção pelo polímero de cadeia longa, novas partículas serão “ligadas”, formando uma unidade grande chamadas de flocos, a alta eficiência da floculação está associada a cadeias longas que possuam grupos funcionais capazes de adsorver as partículas suspensas.

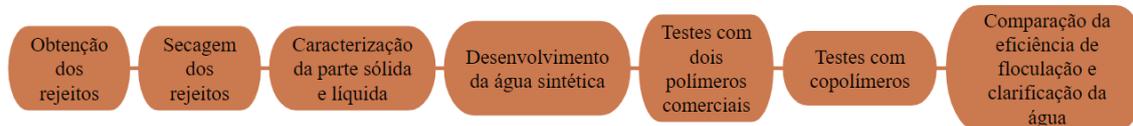
Observa-se um bom desempenho de um polímero aplicado como floculante pela sua capacidade de obtenção de sólidos adensados (com baixíssimo teor de água) e uma água com qualidade necessária para poder ser reutilizada no processamento mineral, além de parâmetros das fases líquidas (PSD, mineralogia e densidade de carga superficial) e da fase líquida (condutividade elétrica, pH e concentração de eletrólito) que devem ser analisados para determinar o polímero a ser usado no rejeito.

A maior parte dos rejeitos minerais são tratados com poliacrilamida (PAM), que pode ser aniônica, catiônica ou não iônica, mesmo apresentando uma capacidade grande em produzir grandes flocos, o PAM apresenta muitas desvantagens que afetam o processo de tratamento, impacta o meio ambiente e podendo até mesmo afetar a saúde humana. Com base nos estudos já desenvolvidos para o tratamento de areia betuminosa e de rejeitos de minério de ferro (ZAGO, 2022), serão comparadas a eficiência de quatro flocculantes, sendo duas poliacrilamidas não iônicas comerciais: 1) PAM1 (Sigma Aldrich) flocculante utilizado em escala laboratorial e 2) PAM2 (Kemira Chemicals) usado para tratar rejeitos minerais industriais. Assim como, serão analisados também cloreto de poli (vinil benzil) trimetilamônio (PVB) e um poli(metilacrilato) parcialmente hidrolisado enxertado em esqueletos de copolímeros de etileno-propileno-dieno (EPDM-g-HPMA), sendo alternativas mais sustentáveis as utilizadas convencionalmente.

4 METODOLOGIA

Este trabalho propõe o emprego de biopolímeros avançados com capacidade de floculação seletiva dos componentes minerais presentes em polpas e lamas de barragens. Os estudos serão conduzidos com amostras reais fornecidas por empresas parceiras, que após caracterização físico-química completa, serão submetidas a testes de floculação na presença de polímeros projetados para esta função específica. Após realização de testes em escala de bancada e pré-seleção dos polímeros, o sistema será avaliado em unidade piloto, na qual os melhores parâmetros de sedimentação e clarificação da água produzida sejam otimizados. A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia adotada.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia adotada



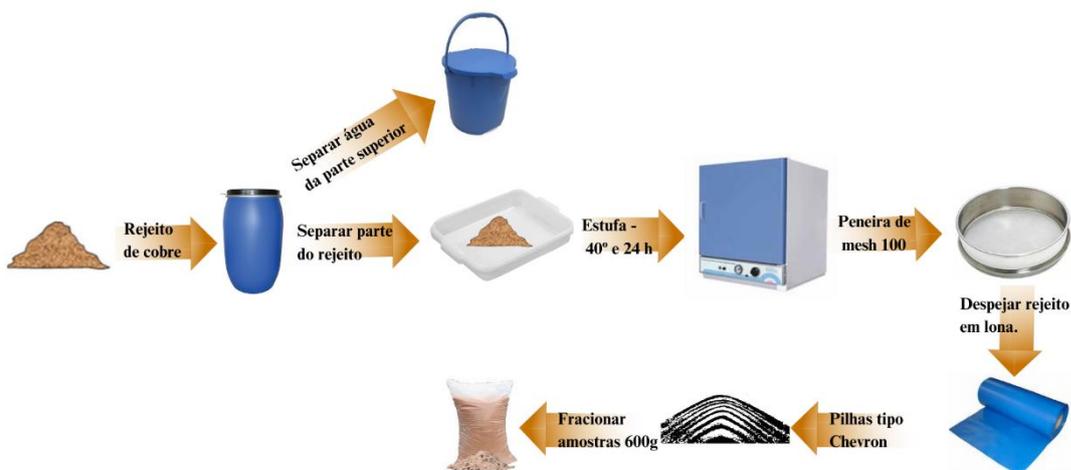
Fonte: autores.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este trabalho encontra-se na fase inicial das atividades laboratoriais, onde já foi possível (i) obter os rejeitos disponibilizados pela empresa mineradora, (ii) iniciar o processo de secagem do rejeito para os testes das etapas seguintes e (iii) caracterizar a água produzida durante o processo de beneficiamento do cobre.

Na Figura 2 é apresentado o procedimento desenvolvido para secagem do rejeito. Enquanto na Tabela 1, são apresentados os resultados da análise da água obtida após espessamento e desaguamento do rejeito. A amostra de água analisada foi obtida após a decantação do rejeito por mais de 30 dias. Ao finalizar a secagem dos rejeitos, a água sintética baseada na composição da água de processo será produzida para testes comparativos entre os polímeros comerciais e os biopolímeros produzidos pela universidade parceira no Canadá. Com isso, busca-se contribuir para solução de problemas ambientais típicos da atividade de mineração, assim como desenvolver de materiais poliméricos avançados sustentáveis e de baixo custo, visando o lançamento de novos produtos no mercado e a formação de uma rede cooperativa de pesquisa, focada no desenvolvimento e transferência de soluções inovadoras na área de mineração com o uso de materiais avançados para o meio ambiente.

Figura 2 – Procedimento de secagem do rejeito de cobre



Fonte: autores.

Tabela 1 - Caracterização da água obtida com o desaguamento do rejeito

Ensaio	Resultado	Unidade	Ensaio	Resultado	Unidade
Cálcio total	1100	mg/L	Alcalinidade total	34,19	mg/L CaCO ₃
Potássio total	124	mg/L	Dureza total	2799	mg/L CaCO ₃
Magnésio total	13	mg/L	Dureza Cálcio	2747	mg/L CaCO ₃
Sódio total	388	mg/L	Condutividade	4272	mS/cm
Cloretos	426,2	mg/L	Sulfatos	1940	mg/L
pH	6,5	-			

Fonte: autores.

Análise com base em Zago (2022), demonstra que polímeros a base de acrilamida, como o PAM são os mais utilizados convencionalmente para tratamento de rejeitos de mineração, no entanto, tais polímeros são fortemente hidrofílicos, formando flocos que retêm grandes quantidades de água. Esse fato leva à produção, com determinada frequência, de sobrenadantes turvos não sendo adequado para recuperação da água. Neste sentido, uma alternativa viável é a utilização de polímeros naturais, modificados quimicamente, onde um monômero sintético é ligado à cadeia principal do polímero natural, reação de polimerização por enxerto. Baseado na pesquisa realizada em rejeitos de ferro, onde foram realizadas análises com polímero feito através de copolimerização de enxerto de [cloreto de (2-metacrilóiloxietil) trimetil amônio] na estrutura da amilopectina (AP-g-PMETAC), em diferentes parâmetros estruturais, foi observado que o polímero desenvolvido de forma mais sustentável superou os flocculantes convencionais de poliácridamida. Desta forma, observa-se que os flocculantes AP-g-PMETAC podem se tornar candidatos promissores para o tratamento de rejeitos de cobre.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de mineração enfrenta desafios diários para encontrar um fim adequado para um elevado teor de rejeitos que são subprodutos dos processos que envolvem o beneficiamento mineral. Assim, convém obter tecnologias que sejam eficazes no tratamento, reduzindo os impactos causados. A aplicação de tratamentos adequados nos rejeitos, além de possibilitar um

viés mais sustentável para a mineração, pode sugerir uma possibilidade de reaproveitamento dos rejeitos sólidos e da água clarificada na cadeia produtiva.

Neste sentido, a aplicação da técnica de floculação utilizando biopolímeros demonstra ser um caminho promissor para promover um tratamento mais eficiente, sem gerar impactos ao meio ambiente e à saúde humana. Nessa etapa do trabalho, após a obtenção do rejeito disponibilizado pela mineradora, foi iniciado o procedimento de secagem do rejeito e análise da água proveniente do desaguamento do rejeito para reprodução dessa água em laboratório (água sintética) necessária para os testes com a parte sólida do rejeito, os polímeros comerciais e os novos biopolímeros. Assim como tem sido observado em rejeitos provenientes da extração do ferro, espera-se obter resultados promissores para floculação do rejeito de cobre e clarificação da água a partir de um produto mais sustentável como os biopolímeros. Desta forma, minerais poderão ser recuperados para ser fornecidos, por exemplo, à indústria de fertilizante e cimentação e a água reutilizada em novos processos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília, 2023. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2023.

BOLTO, B.; GREGORY, J. **Organic polyelectrolytes in water treatment**. Disponível em: <https://www.academia.edu/11820156/Organic_polyelectrolytes_in_water_treatment>. 2007. Acesso em: 19 ago. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Livro Verde da Mineração do Brasil**. Brasília, 2022. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/11/IBRAM_LivroVerde-digital-030123ld.pdf. Acesso em: 18 ago. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Economia Circular e Mineração. **IPT**, 07 jun. 2022. Disponível em: https://www.ipt.br/noticia/1739-economia_circular_e_mineracao.htm. Acesso em: 18 ago. 2023.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 29 ago. 2023.

MARTIM, H.; SANTOS, V. **Avaliação de impactos ambientais em empresa de mineração de cobre utilizando redes de interação**. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/10382/pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2023.

SIAH, C.; ROBINSON, J.; FONG, M. 2014. **A review on application of flocculants in wastewater treatment**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582014000561>>. Acesso em: 18 ago. 2023.

ZAGO, G. **Novel natural-based polymers for dewatering iron ore tailings**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: GEN LTC, 2015. p. 1-432.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP nº 159/2022) e Fundação Escola Politécnica (FEP), e a empresa mineradora que disponibilizou o rejeito para realização desse trabalho.