

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/363

Análise da Curva de Retenção de Água em Rejeitos de Mineração com Polímero: Avaliação Experimental e Numérica das Propriedades Hidráulicas

Giovana Abreu de Oliveira
Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil giovana.oliveira@fontesgeotecnica.com

Paulo Victor Freire Santos
Engenheiro Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, paulovi125@hotmail.com

André Luis Brasil Cavalcante, PhD.
Professor Associado, Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A investigação da sucção e das propriedades hidráulicas não saturadas em rejeitos de minério de zinco é de suma importância devido aos impactos ambientais associados à disposição desses resíduos. A contaminação do lençol freático por rejeitos de mineração é um problema relevante, sendo crucial compreender e mitigar os processos hidrodinâmicos que afetam a mobilidade e a interação desses materiais com a água subterrânea. Diante disso, neste estudo, foi analisada a sucção de água em rejeitos de minério de zinco, tanto na forma pura quanto com a adição de um aditivo polimérico com capacidade superabsorvente. Por meio de ensaios de curva de retenção de água no rejeito e da curva de condutividade hidráulica não saturada, obtidos tanto experimentalmente quanto mediante a uma simulação numérica computacional, foram determinadas as sucções mátrica e total, permitindo uma comparação entre as propriedades hidráulicas dos rejeitos com e sem a influência da absorção. Essa abordagem será usada como um comparativo fundamental neste trabalho. Além disso, foram exploradas correlações numéricas entre a sucção e propriedades hidráulicas não saturadas, como a condutividade hidráulica. Os resultados destacam a influência significativa do polímero superabsorvente na modificação das propriedades de sucção e no comportamento do fluxo de fluidos nos rejeitos, evidenciando possíveis estratégias para minimizar os impactos ambientais associados à contaminação do lençol freático por rejeitos de mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Sucção; Rejeito de Mineração; Propriedades Hidráulicas Não Saturadas; Polímero Superabsorvente; Contaminação.

ABSTRACT: The investigation of suction and unsaturated hydraulic properties in zinc ore tailings is of paramount importance due to the environmental impacts associated with the disposal of these wastes. Groundwater contamination by mining tailings is a significant issue, making it crucial to understand and mitigate the hydrodynamic processes that affect the mobility and interaction of these materials with groundwater. In this study, water suction in zinc ore tailings was analyzed, both in pure form and with the addition of a superabsorbent polymer additive. Through water retention curve tests on the tailings, obtained both experimentally and through computational numerical simulation, matrix and total suctions were determined, allowing a comparison between the hydraulic properties of the tailings with and without the influence of absorption. This approach will be used as a fundamental comparative in this work. Furthermore, numerical correlations between suction and unsaturated hydraulic properties, such as hydraulic conductivity, were explored. The results highlight the significant influence of the superabsorbent polymer on modifying the suction properties and fluid flow behavior in the tailings, demonstrating potential strategies to minimize the environmental impacts associated with groundwater contamination by mining tailings.

KEYWORDS: Suction; Mining Tailings; Unsaturated Hydraulic Properties; Superabsorbent Polymer; Contamination.

1 INTRODUÇÃO

A atividade minerária é fundamental para a economia do Brasil, tendo gerado um faturamento de R\$ 339,1 bilhões em 2021, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). No entanto, é importante destacar que a mineração também apresenta desafios e impactos ambientais significativos. Para minimizar esses impactos e garantir a sustentabilidade da atividade minerária, é necessário o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, bem como a adoção de práticas de mineração responsável (IBRAM, 2021).

Um dos grandes problemas da atividade minerária é a contaminação do lençol freático devido a presença de metais pesados e contaminantes no rejeito proveniente do beneficiamento de minérios. Em muitos casos, os rejeitos de mineração podem conter substâncias tóxicas, como metais pesados (por exemplo, chumbo, mercúrio, cádmio) e outros compostos químicos nocivos, que, quando não gerenciados adequadamente, podem infiltrar-se no solo e contaminar as águas subterrâneas, incluindo o lençol freático.

O transporte de substâncias contaminantes ou poluentes no solo pode acontecer devido a diferenças nas velocidades ou concentrações, onde a quantidade de material poluente se move através do líquido presente no solo, principalmente água. Em situações onde há um fluxo rápido da água pelo solo, o transporte principal é conduzido pela dispersão física. Em contraste, em situações de baixa velocidade ou mesmo em condições de repouso, os poluentes migram principalmente por difusão (GILLHAN et al., 1984).

Uma das opções para controlar a disseminação de áreas contaminadas no solo é o emprego de novos materiais geotécnicos alternativos, como polímeros, geossintéticos e fibras. Estudos com geossintéticos têm se difundido bastante nos últimos anos. Já a utilização de fibras é um estudo bastante recente, tendo como um dos precursores o estudo de Vidal (1969) que introduziu a ideia do solo reforçado, ou chamada “terra reforçada” com fibras e Vieira (2021) que introduziu um estudo do potencial de adsorção de fibras de PVDF (fluoreto de polivinilideno), analisando, inclusive, a capacidade da fibra de absorver contaminantes.

Em relação aos polímeros, as pesquisas ainda têm sido mais voltadas para a resistência mecânica do material a ser estabilizado. Estudos como os de Alelvan (2022) avaliam o uso de polímeros em rejeitos de mineração, obtendo resultados positivos em relação à redução da umidade dos rejeitos nos processos de empilhamento à seco e à melhoria das propriedades mecânicas dos rejeitos estabilizados, respectivamente. Ademais, Oliveira (2023) estudou um polímero superabsorvente capaz de aumentar significativamente a capacidade de absorção de água no solo.

Com base nas problemáticas trazidas e nas possíveis soluções encontradas, ainda pouco estudadas, propõe-se, neste estudo, a avaliação da influência de um polímero superabsorvente inerte, com base em cinzas vulcânicas e policarilato de sódio, para avaliar a sucção e o transporte de fluidos e contaminantes em rejeito de minério de zinco. Para embasar esta análise, foi conduzido neste estudo o ensaio de curva de retenção de água na matriz de rejeito puro e com adição de polímero a fim de se verificar o comportamento da sucção (total, mátrica e osmótica) do rejeito em ambas as formas e atrelar os resultados a possíveis comportamentos de adsorção, dispersão e sorção dos fluidos.

Posteriormente, entendeu-se relevante avaliar matematicamente outras propriedades hidráulicas não saturadas, como a permeabilidade não saturada, que será feita com base em análises numéricas correlacionadas às formulações descritas por Cavalcante & Zonberg (2017).

2 METODOLOGIA

2.1 Meio Poroso Não Saturado

No contexto da disposição de rejeitos de mineração, o meio poroso não saturado refere-se à condição em que os vazios do material não estão completamente preenchidos com água. Avaliar esta condição é fundamental para compreender a dinâmica da água e dos contaminantes nos rejeitos depositados em pilhas. A fase não saturada influencia diretamente as propriedades hidráulicas do meio, como a capacidade de retenção de água, a sucção capilar e a condutividade hidráulica não saturada, sendo essencial para estimar o potencial de transporte de contaminantes e a interação água-rejeito.

A caracterização das propriedades hidráulicas não saturadas dos rejeitos é de suma importância para uma disposição adequada em pilhas de mineração. Isso permite avaliar os riscos de contaminação do lençol freático e propor estratégias eficazes de mitigação ambiental. O conhecimento das propriedades hidráulicas não saturadas, como a sucção e a condutividade hidráulica não saturada, também é crucial para prever fenômenos como infiltração de água, transporte de contaminantes e estabilidade das pilhas, impactando diretamente na segurança ambiental e na sustentabilidade das operações de mineração.

Essa compreensão é embasada por estudos como os de Bear et al. (1999), que compararam análises de fluxo saturado e não saturado em lagoas revestidas e não revestidas, e também por referências clássicas como os trabalhos de Fredlund e Rahardjo (1993) sobre mecânica dos solos não saturados e demais autores como Freeze e Cherry (1979) e Van Genuchten (1980).

2.1.1 Sucção

A sucção em solos não saturados é um parâmetro fundamental que influencia tanto o comportamento mecânico quanto hidráulico desses materiais. Ela representa o potencial termodinâmico da água nos poros do solo em relação a um estado de referência de água livre. Esse estado de água livre é caracterizado por ausência de solutos dissolvidos, não interação com outras fases que causem curvatura na interface ar-água e ausência de forças externas que não a gravidade (Lu e Likos, 2004). Os mecanismos físicos e físico-químicos que contribuem para a sucção total do solo são aqueles que reduzem o potencial da água nos poros em relação a esse estado de referência.

A relação termodinâmica entre a sucção do solo, ou seja, a energia livre da água no solo, e a pressão parcial do vapor de água nos poros é fundamental para compreender como a sucção influencia o transporte de contaminantes e o comportamento hidráulico dos solos não saturados. A partir da curva de retenção de água, que descreve a relação entre sucção e teor de umidade volumétrica, é possível modelar propriedades como a permeabilidade (Cavalcante & Zonberg, 2017). Essa compreensão é essencial para avaliar os riscos de contaminação do lençol freático por metais, como destacado nos estudos de Alcântara (2020).

A sucção total do solo é geralmente composta por duas parcelas distintas: sucção mátrica e sucção osmótica. A sucção mátrica é atribuída às interações entre a água nos poros e os sólidos do solo, também conhecidos como matriz do solo (Lu e Likos, 2004). Essa sucção reflete o potencial termodinâmico da água nos poros em relação à matriz sólida do solo, influenciando diretamente as propriedades hidráulicas e o comportamento de retenção de água do solo não saturado. Por outro lado, a sucção osmótica está associada à presença de solutos dissolvidos, como sais, na água do solo (Camapum de Carvalho et al., 2015).

Para este estudo, o foco principal está na sucção mátrica, uma vez que ela descreve as interações físicas entre a água e os sólidos do solo, que são importantes para compreender a capacidade de retenção de água e a resposta hidráulica dos rejeitos de mineração. A sucção mátrica será representada e analisada por meio da curva de retenção de água no solo, a qual estabelece a relação entre a sucção do solo e o teor de umidade volumétrica da água (θ_w).

2.1.2 Curva de Retenção de Água no Solo

A curva de retenção de água no solo é essencial para compreender as propriedades dos solos não saturados, pois estabelece a relação entre a sucção do solo e o teor de umidade volumétrica da água (θ_w). Conforme discutido por Lu e Likos (2004), em condições de baixo teor de umidade e altos valores de sucção, a água nos poros se mantém principalmente na forma de filmes finos nas superfícies das partículas, sendo a adsorção o mecanismo dominante. Em contraste, em condições de alto teor de umidade e baixos valores de sucção, a capilaridade torna-se o principal mecanismo de retenção, influenciada pela estrutura das partículas, pelos poros e pela distribuição granulométrica do solo (Edlefsen e Anderson, 1943). Para determinar a curva característica de água no solo, foram realizados ensaios seguindo a metodologia do papel filtro, conforme a norma ASTM D 6836 (2002).

Esses dados são importantes porque permite entender como o solo retém e libera a água, o que é fundamental para o manejo da água no solo em diversas aplicações. Com base na curva de retenção de água no solo, é possível determinar a quantidade de água que um solo pode reter, o tempo que leva para a água se infiltrar no solo e a quantidade de água disponível depois de infiltrada. (Barreto et al, 2012). Com isso, torna-se possível entender como a ação do Polímero Superabsorvente no rejeito de minério de zinco atua em relação à sua capacidade de retenção de água e de contaminação do lençol freático.

O ensaio é realizado colocando-se as amostras de rejeito e compósito e um papel filtro em um recipiente hermético, permitindo a equalização de umidade entre eles, seguindo a norma ASTM D 6836 (2002). Após a equalização, mede-se o teor de umidade gravimétrico do papel filtro e, através de uma curva de calibração fornecida pela norma, é possível determinar a sucção do papel filtro, que será a mesma do solo. Isso possibilita obter um ponto da curva característica de retenção de água do solo.

A obtenção da curva característica de retenção de água do solo pela trajetória de umedecimento inicia-se com a moldagem dos corpos de prova (CPs). Foram moldados 11 corpos de prova para rejeito puro e 11 para os compósitos, considerando, para ambos, a trajetória de umedecimento. A moldagem dos anéis seguiu os teores de umidade ótimos obtidos em ensaio de compactação Proctor Normal, sendo 15% para o rejeito puro e 28% para o rejeito com adição de polímero superabsorvente. A massa específica de moldagem foi a massa específica ótima determinada pelo Proctor Normal, que foram respectivamente, 2,06 e 1,91 g/cm³, conforme apresentado na Figura 1. Após a moldagem, os CPs foram deixados secar por 7 dias até atingir a umidade higroscópica.

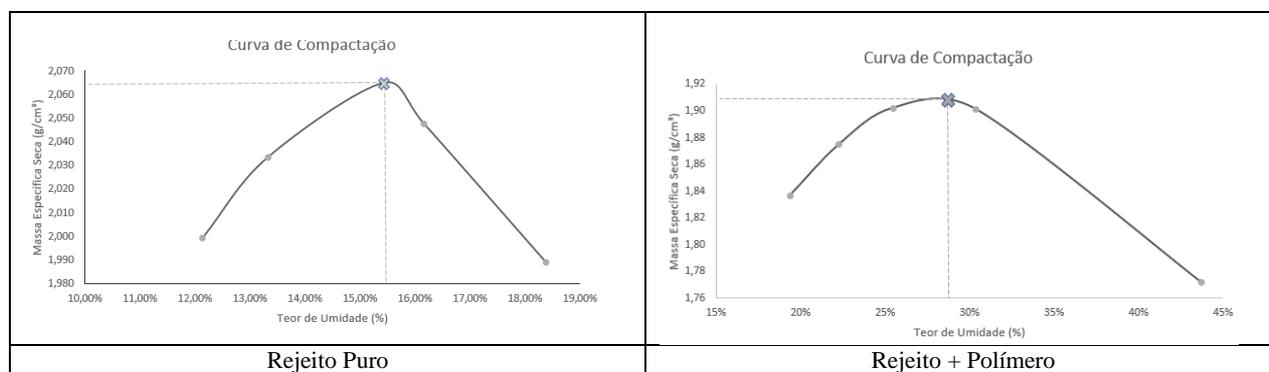


Figura 1 – Curvas de compactação

O umedecimento dos anéis foi realizado mediante gotejamento conforme ilustrado na Figura 1. Vale ressaltar que o gotejamento foi feito lentamente para simular o umedecimento gradual do rejeito em suas condições naturais. Para gerar a curva de retenção de água no solo, a saturação foi feita nos 11 anéis, variando de 10 em 10 % no grau de saturação, a partir de um anel em condições higroscópicas. Após saturados, o papel filtro foi colocado cuidadosamente na extremidade superior, em contato com o solo, para medir a sucção matricial, e na parte inferior, com uma rede entre o anel e o papel, para determinação da sucção total. Em seguida, os anéis foram embrulhados em papel filme e papel alumínio e colocados em caixa de isopor em ambiente com média de 20°C, deixando equalizar por 15 dias.



Figura 2 – Etapas de tratamento do anel filtro (saturação, posicionamento e armazenamento)

Após a equalização, os anéis foram retirados e foi feita a pesagem do papel filtro de cada um deles, pegando-os cuidadosamente com uma pinça e colocando em cápsulas lacradas dentro da balança de precisão. A pesagem foi feita em 5 minutos, anotando as medidas a cada 10 segundos no primeiro minuto e a cada 30 segundos nos 4 minutos restantes. Esses dados foram utilizados para a plotagem da curva da raiz do tempo pelo grau de saturação e, posteriormente, a obtenção da curva de retenção de água no solo através da calibração do papel filtro Whatmann, utilizando a curva proposta por Cavalcante & Zonberg (2017) conforme as equações:

$$\theta(\Psi) = \exp(-\delta_{cz} \Psi) \quad (1)$$

$$\Psi(\theta) = \frac{1}{\delta_{cz}} \ln\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \quad (2)$$

2.1.3 Condutividade Hidráulica Não Saturada

A condutividade hidráulica não saturada é um parâmetro fundamental na caracterização do fluxo de água em solos não saturados. Sua representação gráfica relaciona a condutividade hidráulica do solo não saturado com seu teor de umidade volumétrica ou sucção total correspondente.

Em solos não saturados, a condutividade hidráulica (k_w) é influenciada pela estrutura e dimensão dos poros, bem como pelo teor de umidade volumétrica da água e pelo histórico de saturação do solo (Masrouri et al., 2008). Assim como a curva de retenção de água no solo, diversos pesquisadores propuseram equações para estimar a condutividade hidráulica não saturada, relacionando-a com a sucção ou com o teor de umidade volumétrica (Gardner, 1958; Brooks e Corey, 1964; Van Genuchten, 1980; Cavalcante e Zornberg, 2017).

Conforme apresentado, foram realizados ensaios de curva de retenção de água no solo pelo método do papel filtro, resultando em dados de sucção. Com esses valores, juntamente com ensaios simples de percolação no rejeito previamente realizados, pretendeu-se explorar numericamente as propriedades de condutividade hidráulica não saturada. Utilizou-se a formulação proposta por Cavalcante e Zornberg (2017), descrita nas equações (3) e (4) a seguir. O ajuste de curva foi realizado por meio de um programa executado no software Wolfram Mathematica.

$$k_w(\Psi) = k_s \exp(-\delta_{cz} |\Psi|) \quad (3)$$

$$k_w(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) \quad (4)$$

2.2 Transportes de contaminantes em rejeito de mineração

O transporte de contaminantes em rejeitos de mineração, especialmente metais pesados, é uma preocupação ambiental significativa devido aos riscos potenciais de contaminação do lençol freático e de ecossistemas aquáticos. Estudos como o de Aghili & Hosseinzadeh (2018) demonstram que a lixiviação desses metais pode ocorrer em condições não saturadas, resultando em um transporte significativo para as águas subterrâneas.

Previamente a esta pesquisa, foram realizados, conforme a Norma ABNT NBR 10.007:2004, ensaios de classificação dos resíduos sólidos com o rejeito de minério de zinco utilizado nos ensaios para determinação da curva de retenção deste estudo. Esses ensaios revelaram desvios em relação aos padrões de referência para os parâmetros cádmio, chumbo, fluoreto, manganês, selênio e sulfato no extrato solubilizado, indicando a presença desses metais em concentrações acima dos limites permitidos. A informação acerca da classificação desse rejeito, qualificando-o como Classe I – Resíduo Perigoso, motivaram o principal foco deste estudo que é o de compreender e estudar formas de evitar a contaminação do lençol freático pelos metais presentes nesse tipo de rejeito, além de explorar a capacidade do polímero superabsorvente (SAP) de reter a água no rejeito e retardar o processo de transporte desses contaminantes até o lençol freático.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curva de Retenção de Água no Solo

3.1.1 Modelo Experimental

Conforme descrito no item 2.1.2, os ensaios foram conduzidos de acordo com a metodologia descrita e, após os 20 dias de armazenamento dos anéis para equalização das amostras com o papel filtro, foi possível obter os resultados. A utilização das umidades medidas no papel filtro para determinar a sucção fornece a base necessária para construir a curva de calibração. Conforme mencionado no item 2.3, foi utilizada as formulações disponíveis para o papel filtro Whatmann, baseando-se na metodologia de Cavalcante e Zornberg (2017) para calibrar a curva, através de programa executado no software Wolfram Mathematica, e determinar a sucção. Assim feito, obteve-se as curvas que são apresentadas na Figura 3.

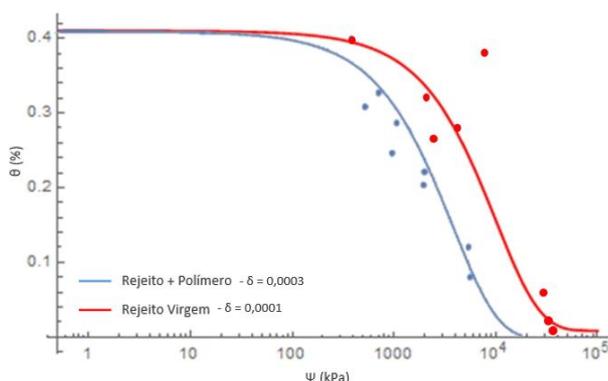


Figura 3 – Curva de Retenção de Água no Solo – Resultados Experimentais

Os resultados da análise das curvas de sucção indicaram que a matriz de rejeito com adição de polímero superabsorvente apresentou sucções menores em comparação com a matriz pura, o que é um achado significativo. A redução na sucção observada na matriz com adição de polímero pode ser explicada pela capacidade do polímero de reter água, limitando assim a disponibilidade de água livre no sistema. O polímero superabsorvente, ao absorver e reter a umidade, parece influenciar diretamente a capacidade de sucção do material, conforme evidenciado pelos resultados.

No entanto, é importante destacar que essa redução na sucção da matriz com adição de polímero pode ter implicações diversas, dependendo das aplicações específicas. Por exemplo, em termos de controle de estabilidade e movimentação de rejeitos, uma menor capacidade de sucção pode ser vantajosa, reduzindo a movimentação de água dentro da matriz de rejeitos, o que pode, por sua vez, reduzir a lixiviação de contaminantes. Por outro lado, para determinadas aplicações como processos de drenagem ou manejo de água, uma menor capacidade de sucção pode ser considerada desfavorável, uma vez que pode dificultar o gerenciamento eficiente da umidade nos rejeitos, exigindo adaptações nas estratégias de gestão de resíduos. Assim, é necessário considerar esses resultados em conjunto com os objetivos específicos de cada contexto de aplicação para uma avaliação completa dos impactos do polímero superabsorvente na sucção e no comportamento dos rejeitos de mineração.

3.2 Curva da condutividade hidráulica não saturada

Conforme descrito no item 2.1.3, com os resultados dos ensaios de papel filtro que determinaram os valores de sucção do rejeito puro e com adição de polímero, foi possível simular um modelo matemático com base nas formulações descritas por Cavalcante & Zonberg (2017), que correlaciona os valores de sucção e de teor de umidade volumétrica, obtidos no ensaio de curva de retenção, e permeabilidade (k_s), também obtido experimentalmente. A Tabela 1 apresenta os valores de k_s para as duas matrizes de rejeito, que foram utilizados para obter a curva da condutividade hidráulica não saturada. Em seguida, a Figura 4 apresenta a curva plotada.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de permeabilidade à carga variável.

Amostra	$k_{20}1$ (m/s)	$k_{20}2$ (m/s)	$k_{20}3$ (m/s)	$k_{20}4$ (m/s)	$k_{20}5$ (m/s)	$k_{20} \text{ med}$ (m/s)	Carga Hidráulica (m)
Rejeito	$6,3 \times 10^{-8}$	$6,1 \times 10^{-8}$	$7,8 \times 10^{-8}$	$7,4 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-8}$	$7,1 \times 10^{-8}$	1,88
Rejeito + Polímero	$4,4 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-8}$	$5,9 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-8}$	1,78

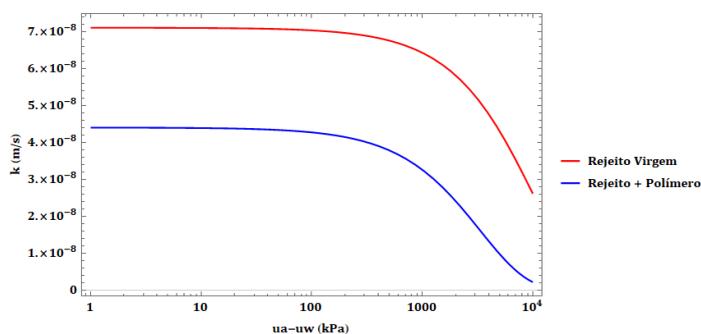


Figura 4 – Curva da condutividade hidráulica não saturada

Com base nos resultados dos ensaios de permeabilidade, observou-se uma ligeira diminuição no coeficiente de permeabilidade com a adição do polímero superabsorvente (SAP) em comparação com a amostra de rejeito puro. Além disso, os resultados das amostras tratadas com o polímero mostraram-se mais próximos entre si. Esses resultados sugerem que o polímero pode ter um efeito de obstrução dos poros, reduzindo a capacidade de fluxo no material e potencialmente melhorando sua estabilidade. No entanto, é importante ressaltar que esses efeitos podem variar dependendo da dosagem dos materiais e da capacidade de absorção intrínseca do SAP, o que deve ser considerado em estudos mais abrangentes para uma compreensão completa dessas interações.

Ao plotar a curva de permeabilidade hidráulica não saturada em relação à sucção, foi possível observar que a curva da amostra de rejeito com polímero superabsorvente também apresentou resultados inferiores à curva da amostra de rejeito puro. Essa tendência de redução na permeabilidade hidráulica não saturada com a presença do polímero reforça a observação anterior de que o polímero pode atuar na obstrução dos poros, limitando a capacidade de fluxo de água no material. Esses dados são importantes para compreender não apenas as propriedades hidráulicas dos rejeitos de mineração tratados com o polímero, mas também para avaliar o potencial impacto dessas alterações nas estratégias de gestão e mitigação dos impactos ambientais associados à disposição desses resíduos.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, é evidente que a adição do polímero superabsorvente (SAP) teve impactos significativos nas propriedades hidráulicas e na capacidade de sucção dos rejeitos de mineração de minério de zinco. A análise das curvas de sucção e permeabilidade hidráulica não saturada revelou uma diminuição tanto na sucção quanto na permeabilidade das amostras tratadas com o SAP em comparação com as amostras de rejeito puro. Essa redução pode ser atribuída ao efeito de obstrução dos poros causado pelo polímero, limitando a capacidade de fluxo de água no material. No entanto, esses efeitos podem variar dependendo da dosagem do polímero e de sua capacidade de absorção intrínseca, destacando a importância de estudos mais abrangentes para compreender completamente essas interações.

Os resultados também destacam implicações práticas importantes para a gestão ambiental de rejeitos de mineração. Enquanto a redução na capacidade de sucção e permeabilidade pode contribuir para a estabilidade e controle de movimentação dos rejeitos, especialmente em termos de mitigação de riscos ambientais, como contaminação do lençol freático, também pode apresentar desafios em certos contextos, como no manejo da drenagem e controle de umidade. Portanto, a utilização do Polímero Superabsorvente (SAP) em rejeitos de mineração requer uma análise dos impactos nas propriedades hidráulicas e na resposta do material a diferentes condições ambientais, visando alcançar um equilíbrio entre a estabilidade do depósito e a eficiência das práticas de gestão ambiental. Esses resultados fornecem uma base sólida para futuros estudos e desenvolvimento de estratégias mais eficazes e sustentáveis para a disposição e controle de rejeitos de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghili, S., Vaezihir, A. & Hosseinzadeh, M. (2018). Distribution and modeling of heavy metal pollution in the sediment and water mediums of Pakhir River, at the downstream of Sungun mine tailing dump, Iran. *Environ Earth Sci* 77, 128. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7283-z>.
- Alcântara, D. V. (2020) *Proposta de Modelo Cinético de Adsorção e Dessorção Aplicado aos Processos de Contaminação de Solos por Metais*. Dissertação Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 117 p.
- Alelvan, G. M. (2022). *Análise Mecânica e Microestrutural de Rejeito de Minério de Ouro Estabilizado Com Solução Polimérica*. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 171p.
- ABNT. NBR 10007:2004: *Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- ASTM. D6836-02: *Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge*. ASTM International, 2002
- Bear, J., Cheng, A. H.-D., Sorek, S., & Ouazar, D. (1999). Seepage into unlined and lined ponds: Comparison between unsaturated and saturated flow analyses. *Water Resources Research*, 35(5), 1461-1469.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers (No. 3)*. Colorado State University.
- Camapum de Carvalho, J., et al. Solos não saturados no contexto geotécnico. *MATEC Web of Conferences*, 2015, p. 01012. DOI: 10.1051/mateconf/202133701012.
- Cavalcante, A. L. B., & Zornberg, J. G. (2017). Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, 1–17.
- Edlefsen, N. E., & Anderson, A. B. Thermodynamics of Soil Moisture. *Hilgardia*, 1943, 15(2), 31-298. DOI: 10.3733/hilg.v15n02p031.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., 507p.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), 228-232.
- Gillham, R. W. *et.al*. An Advection-Diffusion Concept for Solute Transport in Heterogeneous Unconsolidated Geological Deposits. *Water Resources Research*, 20(3), 369–378
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Setor mineral: valores de produção, de exportações e de tributos quase dobram no 1º semestre de 2021*. 2021. Disponível em: <<https://ibram.org.br/ibram-principais-eventos/>>. Acesso em: dez. 2023.
- Lu, N., & Likos, W. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 584p.
- Masrouri, F., Fox, P. J., & Palty, J. (2008). Hydraulic conductivity functions of unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 123-137. DOI: 10.1007/s10706-007-9143-2.
- Oliveira, G, A, O. (2023). *Estabilização química de rejeito de minério de ferro com polímero superabsorvente*. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Vidal, H. (1969). The principle of reinforced earth. *Highway Res. Record*, 282: 1– 16.
- Vieira, G, M, D. (2021). *Avaliação do potencial de adsorção de atrazina em solo pela inserção de fibras de PVDF (Fluoreto de Polivinilideno)*. 2021. xxi, 89 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.