

# Potencial de contaminação do rejeito de mineração oriundo do rompimento da barragem de fundão, Mariana, MG

*Potential contamination of mining waste from the collapse of the Fundão dam, Mariana, MG*

Genelício Crusoé Rocha<sup>1</sup>; Leonardo França da Silva<sup>2\*</sup>; Jéssica Mansur Siqueira Crusoé<sup>1</sup>; José Rafael Franco<sup>3</sup>; Cristiano Marcio Alves de Souza<sup>2</sup>; Victor Crespo de Oliveira<sup>3</sup>; Silvana Ferreira Bicalho<sup>4</sup>; Luciano José Minette<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Minas Gerais – Brasil;

<sup>2</sup> Universidade Federal de Grande Dourado (UFGD) – Mato Grosso do Sul – Brasil;

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – São Paulo – Brasil;

<sup>4</sup> Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia Brasil (UESB) – Bahia – Brasil.

\*Autor correspondente. E-mail: [leonardo.silva@ufv.br](mailto:leonardo.silva@ufv.br)

Recebido: 07/01/2025; Publicado: 03/06/2025

## RESUMO

Este estudo objetiva avaliar a capacidade de retenção e armazenamento de água no rejeito, analisar o potencial de drenagem em diferentes condições e investigar a viabilidade de remediação por meio da mistura do rejeito com o solo, promovendo alternativas sustentáveis para o manejo desse material. Para isso foram coletadas amostras de rejeito em Barra Longa - MG (20°16'33" S, 43°02'30" O), e os experimentos conduzidos na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para as análises, utilizaram-se 12 amostras indeformadas e rejeitos destorroados peneirados em malha de 2,0 mm. Ensaios de lixiviação foram realizados em colunas de PVC, com substratos de rejeito puro e misturado ao solo em diferentes proporções, e volumes variados de água. A análise química dos lixiviados incluiu os elementos ferro, manganês, cobre, cromo, níquel e alumínio, determinados por Espectroscopia de Emissão Atômica (ICP-OES). A condutividade hidráulica saturada foi calculada pelo método de carga constante, e as curvas de retenção foram obtidas em mesa de tensão e câmaras de Richards. Os resultados indicaram que a mistura de rejeito com solo aumenta a retenção de íons metálicos, especialmente ferro, e reduz a lixiviação de elementos potencialmente contaminantes, como alumínio e cromo. Além disso, a mistura favorece a adsorção de cobre, ferro e níquel, enquanto aumenta a concentração de manganês no lixiviado. Esses achados destacam a viabilidade do uso do solo como estratégia para mitigação dos impactos ambientais causados pelos rejeitos.

**Palavras-chave:** Rejeito de mineração; Lixiviação de íons; Recuperação de áreas degradadas.

## ABSTRACT

This study aims to evaluate the water retention and storage capacity of the tailings, analyze its drainage potential under different conditions, and investigate the feasibility of remediation through mixing the tailings with soil, promoting sustainable management alternatives for this material. For this purpose, tailings samples were collected in Barra Longa - MG (20°16'33" S, 43°02'30" O), and the experiments were conducted at the Federal University of Viçosa (UFV). Twelve undisturbed samples and crushed tailings sieved through a 2.0 mm mesh were used for the analyses. Leaching tests were conducted in PVC columns, with substrates of pure tailings and tailings mixed with soil in different proportions, and varying water volumes. The chemical analysis of the leachates included the elements iron, manganese, copper, chromium, nickel, and aluminum, determined by Atomic Emission Spectroscopy (ICP-OES). The saturated hydraulic conductivity was calculated using the constant head method, and retention curves were obtained using a tension table and Richards chambers. The results indicated that mixing tailings with soil increases the retention of metallic ions, especially iron, and reduces the leaching of potentially contaminating elements such as aluminum and chromium. Furthermore, the mixture enhances the adsorption of copper, iron, and nickel, while increasing the concentration of manganese in the leachate. These findings highlight the feasibility of using soil as a strategy for mitigating the environmental impacts caused by tailings.

**Keywords:** Mining tailings; Ion leachin; Recovery of degraded areas.

---

## INTRODUÇÃO

A mineração vem aumentando no Brasil e no mundo, e é cada vez maior a extração de minério de ferro da natureza. Os resíduos que sobram após o processo de extração do minério são chamados de rejeito, este não possui meio de ser tratado e nem devolvido à natureza e como não possui outras utilidades, é descartado. Para o descarte são construídas barragens que precisam de manutenção e cuidados, para que não ocorra ruptura. Já existiram no Brasil rompimentos de barragens, mas o maior deles, em termos de volume de rejeito, foi o rompimento da barragem de “Fundão” (Pinto; Maia, 2018).

No dia 05 de novembro de 2015, aconteceu um dos maiores desastres ambientais na história do Brasil, localizada em Mariana no estado de Minas Gerais, controlada pela Samarco Mineração S.A., que foi o rompimento da barragem de rejeitos de mineração denominada "Fundão". Os rejeitos de mineração destruíram as proximidades da barragem e foram levados por 663 km por afluentes e atingindo o Rio Doce, chegando ao oceano. O volume total da barragem era de 50 milhões de metros cúbicos e pelo menos 34 milhões de m<sup>3</sup> foram lançados no meio ambiente (IBAMA, 2015).

Os rejeitos oriundos da mineração são considerados inertes e compostos principalmente por minério de ferro, areia fina e água. No entanto, estudos indicam que, além da alta concentração de ferro, esses rejeitos podem conter outros metais, como manganês, alumínio, cobre, cromo e níquel, entre outros elementos químicos (Carvalho *et al.* 2017). A presença desses íons metálicos no ecossistema pode ser prejudicial, contribuindo para a contaminação da água, do solo e, conseqüentemente, dos organismos vivos (Kowalkowski; Buszewski, 2002). Por esse motivo, é essencial compreender seus mecanismos de transporte e comportamento no meio ambiente. Segundo He *et al.* (2000), os metais podem deixar os ecossistemas por meio da absorção pelas plantas, lixiviação, escoamento superficial e emissão de gases. Além disso, conforme Kashem *et al.* (2007), em regiões tropicais, o deslocamento descendente dos metais pesados no perfil do solo é predominantemente influenciado pelo regime hídrico e pela capacidade de retenção do solo ou, nesse caso, do rejeito.

Estudos indicam que a mobilidade desses metais no meio ambiente depende de fatores como o regime hídrico e a capacidade de retenção do solo (Kashem *et al.*, 2007). Em especial, o ferro e o manganês possuem

comportamento dependente das condições redox do solo, podendo ser mais facilmente lixiviados ou retidos dependendo da oxigenação do ambiente. O cobre, por sua vez, é um micronutriente essencial, mas sua disponibilidade em solução está relacionada às características físico-químicas do meio. A compreensão desses processos é fundamental para avaliar o potencial de contaminação dos rejeitos e propor estratégias para mitigação dos impactos ambientais (Prior, 2008).

Ao infiltrar e movimentar-se no perfil do solo a água dissolve vários solutos ali presentes podendo atingir concentrações relativamente elevadas. A compreensão dos processos de transferência de solutos no solo e das interações iônicas entre as fases (sólida e líquida) é de fundamental importância para estabelecer práticas de manejo de solo, da água e da planta (Van Lier, 2010).

Muitos impactos da tragédia puderam ser vistos imediatamente, alguns efeitos visíveis são facilmente encontrados e estudados, mas existem aqueles que só aparecerão no futuro e até lá podem causar danos irreparáveis. As propriedades físicas do rejeito têm grande influência no modo como os metais vão se movimentar, por isso o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial contaminante que o rejeito de mineração de ferro oferece para as águas e avaliar as relações físico-hídricas desse rejeito e do rejeito misturado com solo.

O objetivo geral deste trabalho é analisar a capacidade de retenção e armazenamento de água no rejeito, considerando seu impacto no manejo sustentável desses materiais. Especificamente, busca-se (i) avaliar o potencial de drenagem do rejeito em diferentes condições e (ii) examinar a viabilidade de sua remediação por meio da mistura com o solo, a fim de propor soluções que promovam maior eficiência e sustentabilidade.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Lixiviação de íons por meio de coluna de rejeito*

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em ambiente laboratorial. O solo analisado corresponde a um Latossolo contaminado pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG. Esse rejeito apresenta elevados teores de ferro ( $\text{Fe}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{4+}$ ), além de predominância de areia fina.

No dia 9 de maio de 2019, uma equipe de pesquisadores realizou a coleta de amostras em Barra Longa-MG ( $20^{\circ}16'33''$  S e  $43^{\circ}2'30''$  O), um dos municípios atingidos pelo desastre. As amostras foram retiradas das margens do rio Carmo, utilizando enxadas para escavação e sacos plásticos para acondicionamento (Figura 1).



**Figura 1.** Equipe em campo para coleta de amostras deformadas e indeformadas.

Além disso, foram coletadas 12 amostras indeformadas com o auxílio de um trado e anéis volumétricos, sendo: 3 amostras destinadas ao cálculo da densidade do rejeito, 4 para a determinação da condutividade hidráulica saturada e 5 para a obtenção da curva de retenção de água no solo. Após a coleta, as amostras foram embaladas em filme PVC e papel alumínio, transportadas e armazenadas em geladeira até o momento das análises no Laboratório de Física do Solo da UFV. As amostras deformadas foram destorroadas, submetidas a secagem (Figura 2) ao ar por 6 dias e posteriormente peneiradas em malha de 2,0 mm de abertura, conforme descrito por Bernardes (2005) e Campos (2010).



**Figura 2.** Rejeito disposto em bancadas para secagem ao ar.

Para analisar a lixiviação dos íons presentes no rejeito, foi conduzido um ensaio laboratorial de transporte de solutos em colunas de PVC, preenchidas com o rejeito em estudo, conforme metodologia descrita por Van Lier (2010). Foram avaliados diferentes tratamentos, considerando a presença ou ausência de solo misturado e distintos volumes de água aplicada.

O estudo seguiu um esquema fatorial ( $2 \times 4 \times 3$ ), em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Os fatores analisados foram substrato (2 níveis) e volume de água percolante (4 níveis). O primeiro fator incluiu rejeito puro (R) e rejeito misturado com solo (RS), na proporção volumétrica de 1:1. O segundo fator consistiu em quatro volumes de água percolante, correspondentes a 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 volumes de poros.

As colunas de lixiviação foram confeccionadas com tubos de PVC de 24,5 cm de altura, 10,0 cm de diâmetro externo e volume total de 173,0 cm<sup>3</sup>. Para evitar a perda de material particulado, uma das extremidades dos tubos foi vedada com uma malha fina e um disco de lã de vidro, garantindo a retenção do rejeito no interior da coluna. A estrutura e montagem das colunas podem ser observadas na Figura 3.



**Figura 3.** Montagem, preenchimento e visão geral das colunas de lixiviação.

Para se determinar o volume de água a ser adicionado, como simulação de precipitação, foi utilizado o cálculo de porosidade total do tratamento. A porosidade total ( $PT$ ) é o espaço poroso não ocupado por sólidos ou líquidos, ou simplesmente, poros do solo. A porosidade total foi utilizada para se determinar a quantidade de água que passaria no espaço poroso dos tratamentos. Para se calcular a porosidade total, utilizou-se a relação entre a densidade do solo ( $D_s$ ) e a densidade de partículas ( $D_p$ ), conforme Equação 1.

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p} (m^3 m^{-3}) \quad (1)$$

em que  $PT$  é a porosidade total, em  $m^3.m^{-3}$ ;  $D_s$  é a densidade do solo, em  $t m^{-3}$ ;  $D_p$  é a densidade de partículas, em  $t.m^{-3}$ .

Para o cálculo a densidade do solo ( $D_s$ ) utilizou-se a Equação 2.

$$\rho = \frac{m_s}{V_t} (g cm^{-3}) \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a densidade do solo, em  $g.cm^{-3}$ ;  $m_s$  é a massa de solo seco, em g;  $V_t$  é o volume total do solo coletado, em  $cm^{-3}$ .

De posse do volume total de poros, determinou-se o volume de água a ser aplicado em cada coluna, sendo os tratamentos de volumes de líquido percolante 1,5 volume de poros aumentando para 2,0, 2,5 e 3,0 volumes de poros, correspondentes a 700 mL, 930mL, 1162 mL e 1395 mL, respectivamente. O volume de substratos (R e RS) acondicionado em cada coluna foi de  $142 cm^3$  para se obter uma altura de 20 cm de material na coluna. Para o tratamento RS, utilizou-se  $70,8 cm^3$  de rejeito e  $70,8 cm^3$  de solo. O solo utilizado foi coletado em um horizonte B de um LATOSSOLO VERMELHO Amarelo, típico da região da Zona da Mata de Minas Gerais (Figura 4).



**Figura 4.** Amostra indeformada do rejeito para análise de densidade de partículas pelo método do balão volumétrico.

A solução lixiviada (Figura 5) em cada tratamento (volume de solução e mistura de rejeito com solo) foi coletada em provetas e posteriormente acondicionada em recipientes plásticos e conservadas em refrigerador até as determinações químicas pertinentes. Na sequência, foram determinados, por meio de Espectroscopia de Emissão Atômica (ICP-OES), os elementos químicos: ferro, manganês, cobre, cromo, níquel e alumínio. Estes elementos são os elementos mais presentes nesse rejeito (Crusoé Rocha *et al.*, 2019).



**Figura 5.** Colunas de lixiviação com rejeito montadas e em operação do experimento de lixiviação no laboratório de Física do Solo da UFV.

### **Condutividade Hidráulica Saturada do Rejeito**

Para o cálculo da condutividade hidráulica do meio saturado ( $K_0$ ), foi utilizado o método do parâmetro de carga constante, utilizando o frasco de Mariotte para manter constante a coluna hidráulica acima da amostra. Para tanto, utilizou-se amostras indeformadas coletadas com anéis volumétricos e auxílio de trado tipo Uhland. Os anéis contendo as amostras foram trazidos ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa. Em cada anel foi colocado, em uma das extremidades, um pedaço de tecido poroso (organza), sendo fixado por um anel de borracha. Na outra extremidade foi encaixado outro anel volumétrico com as mesmas dimensões, porém vazio, e vedado com fita tipo esparadrapo para evitar que a água escorra entre os anéis. A finalidade deste anel vazio acima da amostra é manter a carga hidráulica constante necessária à determinação. Posteriormente as amostras foram saturadas com água por ascensão capilar por 72 horas para total saturação do material.

Utilizou-se o apoio de abraçadeiras para que o frasco de Mariotte e o anel volumétrico ficassem em nível e a carga hidráulica constante de 2,0 cm de altura (Figura 6). O volume de solução drenado foi medido em função do tempo.



**Figura 6.** Condutividade Hidráulica Saturada do Rejeito por meio do método do permeâmetro de carga constante.

Os cálculos foram realizados com base na média entre os valores observados, com quatro repetições. A equação 3 foi usada para o cálculo da  $K_0$ .

$$K_0 = \frac{Va * L}{A * t * (h + L)} \quad (3)$$

em que  $K_0$  é a condutividade hidráulica saturada,  $\text{cm.h}^{-1}$ ;  $Va$  é o volume da água percolado, em mL;  $L$  é a altura da camada da amostra, em cm, medida com régua;  $A$  é a área da secção transversal da amostra, em  $\text{cm}^2$ ;  $h$  é a carga hidráulica sobre a amostra, em cm;  $t$  é o tempo correspondente ao volume de água percolado, em hora.

### **Curva de retenção da água**

Para elaboração da curva de retenção, primeiramente as amostras indeformadas foram colocadas por 72 horas em água para saturação por ascensão capilar. Após a saturação foram levadas à mesa de tensão, aplicando as tensões de 2, 4, 6 e 10 kPa, até cessar a drenagem da água nas amostras. Após o equilíbrio, as amostras foram

pesadas para obtenção da massa úmida. Para tensões superiores a 10 kPa, foram utilizadas câmaras de Richards, submetendo as amostras às pressões de 100, 500 e 1500 kPa.

### **Tratamentos Estatísticos**

O estudo seguiu um esquema fatorial ( $2 \times 4 \times 3$ ), em delineamento inteiramente casualizado, totalizando 24 parcelas experimentais. Foram avaliados dois fatores: tipo de substrato (2 níveis: rejeito puro e rejeito misturado com solo) e volume de água percolante (4 níveis: 700 mL, 930 mL, 1162 mL e 1395 mL, correspondentes a 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 vezes o volume de poros do solo, respectivamente). Cada combinação de tratamento foi realizada em triplicata, garantindo a robustez estatística do experimento.

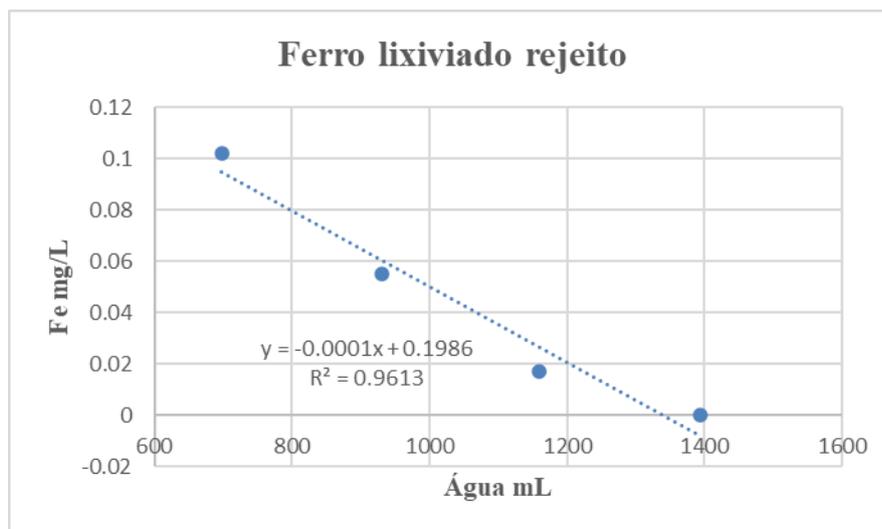
Para a análise dos dados, foram empregadas análise descritiva, análise de variância (ANOVA), teste F, teste de Tukey para comparação de médias e análise de regressão, permitindo a avaliação da significância dos efeitos dos fatores estudados.

## **RESULTADOS**

Inicialmente procedeu-se ao estudo das propriedades físicas do rejeito. A densidade do rejeito encontrada pelo método do anel volumétrico foi de  $1,996 \text{ g cm}^{-3}$ , já a densidade de partículas do rejeito encontrada pelo método do balão volumétrico foi de  $2,926 \text{ g cm}^{-3}$ . A Porosidade total foi  $0,328 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . O volume de poros na coluna de lixiviação, considerado para o experimento de lixiviação de íons foi de  $464,98 \text{ cm}^3$ .

### **Lixiviação de íons**

A lixiviação de íons pode ser considerada um indicativo da capacidade contaminante que um determinado material possui. As análises da solução lixiviada, em todos os tratamentos, apresentam baixos, ou nulos, teores de alumínio e cromo.



**Figura 7.** Teores de ferro lixiviado do rejeito

Os teores de ferro lixiviados diminuíram com o aumento do volume de água adicionado, tendo desta forma, um efeito de diluição. Solos bastantes intemperizados, como é o caso dos solos das regiões tropicais, onde predomina mineralogia oxidica (principalmente Fe, Al e Mn) e caulínica na fração argila, apresenta grande potencial na adsorção de íons metálicos (Campos, 2010) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Teores médios de níquel lixiviado do rejeito, em função do volume de água adicionado em colunas de lixiviação.

Tratamentos	----- Ni (mg L <sup>-1</sup> )-----
Rejeito + Vol 1	0,128 a A
Rejeito + Vol 2	0,092 a AB
Rejeito + Vol 3	0,067 a AB
Rejeito + Vol 4	0,046 a AB
Rejeito + Solo + Vol 1	0,005 a AB
Rejeito + Solo + Vol 2	0,025 a AB
Rejeito + Solo + Vol 3	0,021 a B
Rejeito + Solo + Vol 4	0,024 a B

Nota: Vol é o volume de água equivalente ao volume de poros. Vol 1 – 700mL; Vol 2 - 930mL; Vol 3 – 1162 mL; Vol 4 - 1395mL. Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de *Tukey*, a 5 de probabilidade, dentro do tratamento apenas Rejeito e volume de água adicionado, e Rejeito mais Solo e volume de água adicionado. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de *Tukey*, a 95 % de probabilidade, entre os tratamentos Rejeito e Rejeito mais Solo.

O Níquel foi lixiviado a diferença entre as médias, porém seu coeficiente de variação está muito alto, isso pode ser devido ao fato de que o aparelho utilizado nas leituras não detecta concentrações tão baixas desse elemento, portanto não podemos inferir que os diferentes tratamentos influenciaram as médias. Para chegar a resultados mais precisos precisaria repetir o experimento utilizando outra metodologia para detecção do íon Ni.

### **Curva de retenção**

A retenção de água no rejeito foi avaliada por meio da curva de retenção, permitindo identificar sua capacidade de armazenamento hídrico em diferentes potenciais mátricos. Os valores obtidos indicam uma baixa retenção de água, especialmente sob tensões mais elevadas, refletindo a predominância de partículas de granulometria grossa e baixa capacidade de adsorção hídrica.

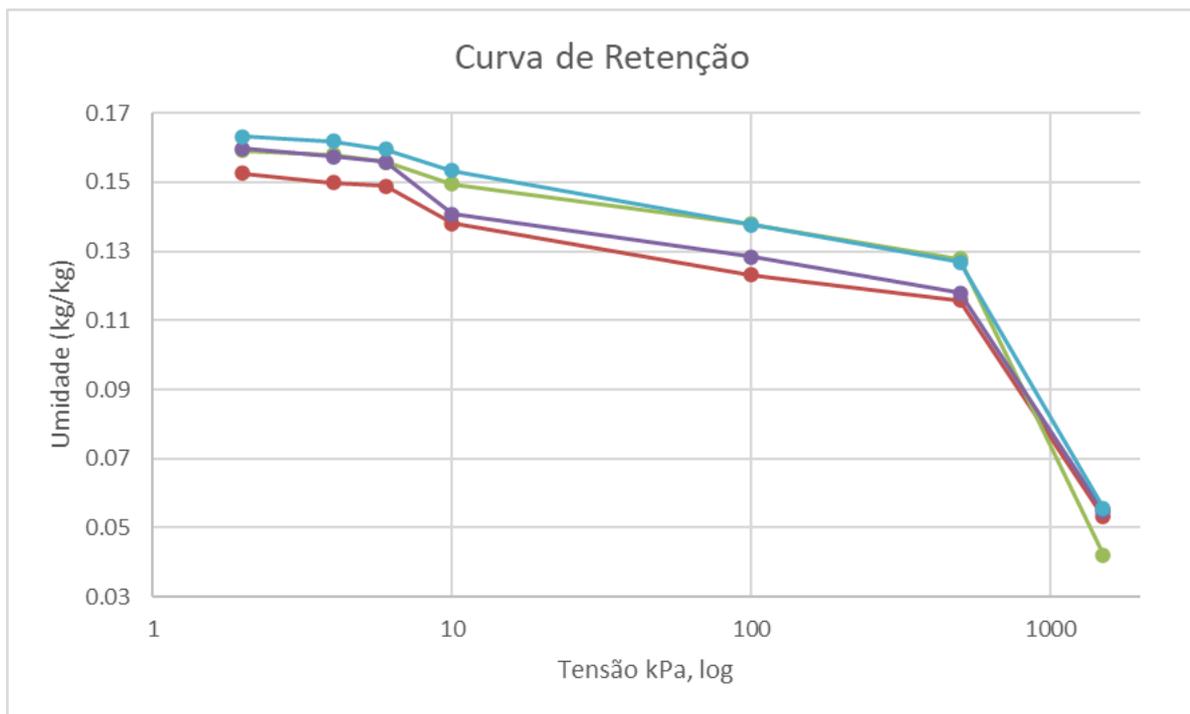
A Tabela 2 apresenta os valores médios de umidade do rejeito em diferentes tensões aplicadas, evidenciando que, mesmo em potenciais próximos à saturação, a retenção de água permanece baixa. Esses resultados indicam que o rejeito tem limitada capacidade de armazenar água no perfil do solo, o que pode influenciar sua dinâmica no ambiente e aumentar o risco de escoamento superficial.

**Tabela 2.** Análise estatística dos valores encontrados na Curva de Retenção da Água no Rejeito Saturado.

Potencial (kPa)	Umidade (kg kg <sup>-1</sup> )
2	0,168 a
4	0,167 a
6	0,165 ab
10	0,155 ab
100	0,139 ab
500	0,128 ab
1500	0,053 b

Nota: Vol é o volume de água equivalente ao volume de poros (qual a unidade? m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, mm<sup>3</sup>). Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem pelo teste de *Tukey*, a 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação 13,259%.

Por meio da curva de retenção (Figura 8), observa-se que o rejeito tem baixa retenção de água, mesmo em potenciais próximos a saturação (por exemplo, 2 kPa). As características granulométricas (Tabela 3), e sua mineralogia refletem um material com baixa capacidade de adsorção de água. A retenção de água para as tensões de 2, 4 e 6 kPa foram iguais, para a média de quatro repetições (4 amostras), sendo de 0,16 kg kg<sup>-1</sup>, podendo ser considerada muito baixa. A tensão de 10 kPa apresenta uma média de 0,15 kg kg<sup>-1</sup>. Para as tensões de 100, 500 e 1.500 kPa, os valores médios de umidade foram de 0,13, 0,12 e 0,05 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. A maior diferença na retenção de água ocorre entre os pontos de 500 e 1.500 kPa, sendo o valor médio de umidade de 0,12 e 0,05 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Figura 8.** Curvas de retenção da água do rejeito de mineração.

**Tabela 3.** Análise granulométrica do rejeito de mineração.

Tratamento	Análise granulométrica				Classe Textural
	Areia grossa	Areia fina (dag/kg)	Silte	Argila	
Tecnossolo	4,2	46,3	45,2	4,3	Franco arenoso

Machado (2008), estuando a capacidade de retenção de água em LATOSSOLO VERMELHO distrófico com diferentes usos do solo nos últimos 20 anos, sendo cultivado com (a) mata - floresta estacional semidecidual; (b) pousio - vegetado permanentemente com gramínea *Brachiaria decumbens*. Foram encontrados valores superiores de retenção de água comparado ao rejeito, principalmente em solos cultivados com mata nativa. Para as tensões mais baixas os solos em pousio e cultivo apresentaram valores maiores, porém próximos ao rejeito, já os solos cultivados com mata nativa apresentaram valores consideravelmente mais altos que o rejeito.

### Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do rejeito foi obtida pelo método do parâmetro de carga constante. Para tanto, foram coletadas quatro (repetições) amostras indeformadas. O valor médio da condutividade hidráulica saturada foi de 0,01096 cm.h<sup>-1</sup>. Ferreira (1999), classifica a condutividade hidráulica saturada para solos agrícolas (Tabela 4). Comparando-se o resultado obtido com a classificação proposta, a condutividade hidráulica obtida é cerca de 10 vezes mais lenta que a classe “Muito Lenta” proposta. Isto permite afirmar que o rejeito de mineração estudado possui baixíssima capacidade de conduzir a água por meio dos seus poros, o que pode resultar em maior escoamento superficial, levando ao processo de erosão.

**Tabela 4.** Classificação da condutividade hidráulica em meio saturado K<sub>0</sub> em cm h<sup>-1</sup> sugerida por Ferreira (1999)

Classificação Intervalo
Muito rápida > 25 cm.h <sup>-1</sup>
Rápida 12,5 - 25 cm.h <sup>-1</sup>
Moderadamente rápida 6,25 - 12,5 cm.h <sup>-1</sup>
Moderada 2 - 6,25 cm.h <sup>-1</sup>
Moderadamente lenta 0,5 - 2 cm.h <sup>-1</sup>
Lenta 0,125 - 0,5 cm.h <sup>-1</sup>
Muito lenta < 0,125 cm.h <sup>-1</sup>

Segundo Bernardes (2005), uma área que apresenta solos com altos teores de argila e silte, observa-se uma média 47,11 cm h<sup>-1</sup> de valores de K<sub>0</sub>, na camada de 0-10cm, valor muito superior ao rejeito. A tabela 3, mostra os valores das repetições.

## DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que o rejeito apresenta propriedades físicas limitantes para uso sustentável em ambientes naturais, como baixa capacidade de retenção de água e reduzida condutividade hidráulica. Essas características favorecem o escoamento superficial e aumentam o risco de transporte de poluentes.

Apesar disso, a adição de solo ao rejeito se mostrou uma alternativa viável para mitigar tais limitações. A mistura resultou em maior retenção de íons metálicos como ferro e cobre, reduzindo sua mobilidade e risco de

contaminação. No entanto, o aumento na concentração de manganês nos lixiviados sugere que seu comportamento deve ser mais bem investigado, sobretudo em condições tropicais e sob diferentes regimes hídricos.

A curva de retenção de água indica que o rejeito, por sua granulometria e mineralogia, não possui capacidade significativa de armazenar água, comportamento esperado para materiais com elevada proporção de areia fina. Isso reforça a necessidade de considerar práticas que melhorem a estrutura física do material, como a mistura com solos mais argilosos.

Quanto à condutividade hidráulica, os valores extremamente baixos indicam que o rejeito, quando disposto em ambiente natural, poderá apresentar acúmulo superficial de água e, conseqüentemente, de elementos contaminantes, caso não haja manejo adequado.

Estudos comparativos com diferentes tipos de solo e proporções de mistura podem ampliar as alternativas de manejo. Além disso, experimentos em condições de campo são recomendados para validar a aplicabilidade dos resultados obtidos em laboratório.

## CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que o rejeito de mineração apresenta baixa retenção de água e baixa condutividade hidráulica, características que limitam sua capacidade de suporte ao desenvolvimento vegetativo sustentável. No entanto, a mistura do rejeito com o solo mostrou-se uma estratégia eficaz para mitigar parte desses impactos, promovendo maior retenção de ferro e cobre e reduzindo sua lixiviação. Por outro lado, observou-se um aumento na mobilidade do manganês, indicando a necessidade de estudos adicionais sobre seu comportamento em diferentes condições edafoclimáticas.

A análise do potencial de drenagem revelou que o rejeito puro apresenta uma taxa de percolação extremamente reduzida, o que pode favorecer o acúmulo superficial de metais e comprometer a qualidade ambiental das áreas afetadas. A introdução do solo ao rejeito, além de alterar a dinâmica dos íons, melhorou a estrutura do material, favorecendo a infiltração e distribuição da água no perfil, o que pode contribuir para estratégias de remediação ambiental e recuperação de áreas degradadas.

Os métodos utilizados, incluindo ensaios de lixiviação e análise da curva de retenção, mostraram-se adequados para a caracterização físico-hídrica do rejeito e para avaliar os efeitos da mistura com o solo. Entretanto, investigações futuras podem aprimorar o entendimento sobre a interação entre os elementos químicos e a fração coloidal do solo, bem como testar diferentes proporções de rejeito e tipos de solos para otimizar estratégias de mitigação. Estudos de campo em larga escala também são recomendados para validar os achados laboratoriais e ampliar as aplicações dos resultados obtidos neste estudo para a recuperação ambiental de áreas impactadas por rejeitos de mineração.

## REFERÊNCIAS

- BERNARDES, R. S. **Condutividade hidráulica de três solos da região norte fluminense**. 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.
- CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2010.
- CARVALHO, M. S. *et al.* Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 3, p. 37-41, 2017. <https://doi.org/10.22571/Actabra13201758>.

CRUSOÉ ROCHA, G. *et al.* Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais: Avaliação do Tecossolo Formado pelo Desastre. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIENCIA DEL SUELO*, 22., 2019, Montevideo, Uruguai. **Anais [...]**. Montevideo, Uruguai: CLACS, 2019.

FERREIRA, P. A. **Drenagem de terras agrícolas**. Viçosa: Editora UFV, 1999.

HE, Z. L. *et al.* Effects of leaching solution properties and volume on transport of metals and cations from a Riviera fine sand. **Journal Environmental Science Health**, Amsterdam, v. 35, p. 981–998. 2000. <https://doi.org/10.1080/10934520009377016>

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laudo técnico preliminar: desastre ambiental – Rompimento da Barragem de Fundão – Mariana/MG. Brasília: IBAMA, 2015. Disponível em: [https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf). Acesso em: 27 maio 2025.

VAN LIER, J. Q. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

KASHEM, M. A. *et al.* Mobility and distribution of cadmium, nickel and zinc in contaminated soil profiles from Bangladesh. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 77, n. 2, p. 187-198, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9056-4>

KOWALKOWSKI, T.; BUSZEWSKI, B. Sorption and migration of selected heavy metals in different soil matrices. **Pollution Journal Environmental Stud**, v. 11, p. 135–139. 2002.

MACHADO, J. L. *et al.* Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200004>

PINTO, S. M. A. C.; MAIA, A. G. **Impactos ambientais da mineração no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2018. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 17 fev. 2025.

PRIOR, M. **Efeito da água residuária de suinocultura no solo e na cultura do milho**. Orientador: Antônio de Pádua Sousa. 2008. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2008.