

## PROGNÓSTICO DA QUALIDADE DE EFLUENTES LÍQUIDOS NAS SAÍDAS DE PILHAS DE REJEITO - FOCO EM MINÉRIO DE FERRO

Rafael Cavalcanti de Albuquerque<sup>1</sup>, Carolina Bittencourt de Abreu<sup>1</sup>, Mariana Werle<sup>1</sup>, Bruno César Mortatti<sup>1</sup>, Thaís de Paula Marteleto<sup>1</sup>, Eduardo dos Santos Costa<sup>1</sup>

**Resumo** – As falhas em barragens de rejeitos no Brasil, ocorridas em 2015 e 2019, evidenciaram a necessidade urgente de adoção de práticas mais seguras e sustentáveis no gerenciamento de rejeitos na mineração de ferro. Em resposta a esses eventos, foi estabelecido o "Global Industry Standard on Tailings Management" (GISTM) (ICMM, 2020), com o objetivo de promover as melhores práticas para assegurar a segurança e integridade das estruturas de disposição de rejeitos. Entre as abordagens inovadoras, o empilhamento seco emergiu como uma alternativa eficaz aos métodos tradicionais de barragens, ao reduzir a retenção de água nos rejeitos e diminuir consideravelmente os riscos hidráulicos associados. Este artigo apresenta um protocolo detalhado para a modelagem Hidrogeoquímica, tanto conceitual quanto numérica, dos processos ocorridos nessas estruturas. O protocolo de caracterização e modelagem foi desenvolvido pela Water Services and Technologies (WST), com base em sua experiência em projetos desse tipo, executados em diversas unidades de beneficiamento de minério de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero (MG). O protocolo facilita a avaliação contínua da estabilidade química dos rejeitos, incorporando análises hidroquímicas que monitoram os reagentes utilizados durante os processos de beneficiamento. O modelo hidrogeoquímico integrado consolida dados sobre a percolação e o movimento de fluidos, considerando fatores geotécnicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, além das propriedades físico-químicas e mineralógicas dos materiais envolvidos. Os resultados obtidos demonstram conformidade com as normas internacionais e as melhores práticas da indústria, reforçando o compromisso com operações de mineração seguras e sustentáveis.

**Abstract** – The tailings dam failures in Brazil, which occurred in 2015 and 2019, highlighted the urgent need for adopting safer and more sustainable practices in iron ore tailings management. In response to these events, the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) was established to promote best practices aimed at ensuring the safety and integrity of tailings disposal structures. Among the innovative approaches, dry stacking has emerged as an effective alternative to traditional dam methods, as it reduces water retention in tailings and significantly decreases associated hydraulic risks. This article presents a detailed protocol for hydrogeochemical modeling—both conceptual and numerical—of the processes occurring within these structures. The characterization and modeling protocol was developed by Water Services and Technologies (WST), leveraging its experience in similar projects carried out for various iron ore beneficiation units located in the Quadrilátero Ferrífero (MG). The protocol facilitates the continuous assessment of the chemical stability of tailings by integrating hydrochemical analyses that monitor the reagents used during beneficiation processes. The integrated hydrogeochemical model consolidates data on fluid percolation and movement, considering geotechnical, hydrogeological, and hydrochemical factors, as well as the physicochemical and mineralogical properties of the materials involved. The results obtained demonstrate compliance with international standards and industry best practices, reinforcing the commitment to safe and sustainable mining operations.

**Palavras-Chave** – Rejeitos; Beneficiamento de Minério de Ferro; Empilhamento a seco, Modelagem Hidrogeoquímica; GISTM.

---

<sup>1</sup> Water Services and Technologies (WST), 30220-140 Belo Horizonte, Minas Gerais, contato@waterservicestech.com

## **1. INTRODUÇÃO**

As falhas em barragens de rejeitos no Brasil, registradas em 2015 e 2019, evidenciaram a necessidade urgente de aprimoramento das práticas de gerenciamento de rejeitos na mineração de ferro. Esses eventos ressaltaram os riscos associados aos métodos convencionais de disposição e impulsionaram a adoção de soluções mais seguras e sustentáveis. Como resposta a essa demanda, foi estabelecido o Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), um padrão internacional que define diretrizes para garantir a segurança e a integridade das estruturas de disposição de rejeitos.

Dentre as abordagens inovadoras adotadas no setor, o empilhamento seco de rejeitos tem se destacado como uma alternativa eficiente às barragens convencionais, reduzindo significativamente a retenção de água nos rejeitos e minimizando os riscos hidráulicos e geotécnicos. No entanto, a implementação dessa técnica exige uma avaliação detalhada dos processos físico-químicos envolvidos, especialmente no que se refere à estabilidade química dos materiais ao longo do tempo e à previsão da qualidade hidroquímica dos drenos gerados pelas estruturas.

Este artigo apresenta um protocolo para a modelagem hidrogeoquímica de rejeitos em empilhamento seco, abordando tanto a construção do modelo conceitual quanto a modelagem numérica dos processos químicos e de transporte de massa nessas estruturas. O protocolo de caracterização e modelagem foi desenvolvido pela Water Services and Technologies (WST), fundamentado na experiência acumulada em projetos dessa natureza, conduzidos em diversas unidades de beneficiamento de minério de ferro situadas no Quadrilátero Ferrífero.

A abordagem proposta permite a avaliação contínua da estabilidade química dos rejeitos, incorporando análises hidroquímicas detalhadas para monitoramento dos reagentes utilizados nos processos de beneficiamento, além da previsão da qualidade hidroquímica dos drenos resultantes dessas estruturas ao longo do tempo. O modelo hidrogeoquímico desenvolvido integra dados sobre percolação e transporte de fluidos, considerando fatores geotécnicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, além das propriedades físico-químicas e mineralógicas dos materiais envolvidos. Os resultados obtidos demonstram conformidade com normas internacionais e melhores práticas da indústria, reforçando a importância da modelagem hidrogeoquímica na gestão segura e sustentável dos rejeitos da mineração.

## **2. PROTOCOLO DE CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM HIDROGEOQUÍMICA**

O protocolo desenvolvido pela WST para caracterização e modelagem hidrogeoquímica baseia-se em diretrizes técnicas consolidadas e na experiência adquirida em projetos, garantindo a elaboração de modelos representativos e robustos. Este protocolo adota uma abordagem integrada, incorporando dados ambientais, informações sobre planejamento de mina, modelo geológico, processamento mineral, aspectos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos. A consideração desses elementos é fundamental para estabelecer as condições geoquímicas no interior dessas estruturas, além de possibilitar a modelagem dos processos que controlam a qualidade hidroquímica dos efluentes provenientes das estruturas de empilhamento seco.

Uma premissa fundamental do protocolo é a construção de um modelo conceitual sólido, essencial para compreender os processos hidrogeoquímicos. Esse modelo deve ser construído de maneira interdisciplinar, integrando conhecimentos geotécnicos, hidrogeológicos e ambientais para assegurar uma representação precisa dos fatores que influenciam a qualidade da drenagem gerada pelas estruturas de disposição de rejeitos. A relação entre os fenômenos geotécnicos e hidrogeológicos, bem como o balanço hídrico, desempenha um papel determinante na dinâmica de percolação da água no interior das pilhas de rejeitos.

O balanço hídrico, ao considerar variáveis como infiltração, evaporação e perdas por drenagem, possibilita uma análise detalhada das interações entre a água e os materiais que compõem as estruturas de disposição de rejeitos. Esse equilíbrio é fortemente condicionado pelos parâmetros geotécnicos das pilhas, como densidade, porosidade, grau de compactação e distribuição granulométrica, os quais determinam a capacidade de retenção hídrica e os mecanismos de mobilidade interna da água. Ademais, a interação entre o sistema hidrogeológico

e a estrutura geotécnica regula o comportamento do fluido no meio, influenciando os padrões de saturação, percolação e os fluxos subterrâneos. Esses aspectos são determinantes para a modelagem dos processos hidrogeoquímicos, permitindo a previsão e o controle dos parâmetros que afetam a qualidade da drenagem nos sistemas de empilhamento seco.

Outro aspecto importante a ser considerado é a formação de trajetórias preferenciais para o fluxo da água dentro dessas estruturas. Tais trajetórias resultam da heterogeneidade do material geotécnico, evidenciada por variações na compactação, presença de descontinuidades (falhas ou fraturas) e diferenças na porosidade dos rejeitos. A percolação através dessas zonas de menor resistência pode acelerar o movimento da água e modificar a distribuição de umidade e solutos no meio. Em consequência, essas trajetórias podem alterar de forma significativa a dinâmica hidrogeoquímica, promovendo a dissolução e o transporte concentrado de espécies químicas, o que impacta diretamente a qualidade da drenagem. Além disso, a presença desses caminhos pode afetar a cinética das reações químicas dentro das pilhas, já que regiões com maior concentração de água podem apresentar condições geoquímicas redutoras, facilitando a solubilização de ferro e manganês, elementos frequentemente detectados nos efluentes dessas estruturas.

### **3. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA**

A metodologia adotada para a caracterização química e mineralógica de pilhas a seco segue uma abordagem integrada, combinando procedimentos sistemáticos de amostragem, análises laboratoriais detalhadas e tratamento estatístico dos dados. Esse processo tem como objetivo representar a heterogeneidade dos rejeitos e compreender os mecanismos que controlam os processos hidrogeoquímicos dentro das estruturas. A caracterização dos rejeitos gera informações quantitativas e qualitativas essenciais para a parametrização de modelos hidrogeoquímicos numéricos, permitindo a identificação dos principais mecanismos de dissolução, precipitação e transporte de elementos. A integração desses dados possibilita a realização de análises de sensibilidade e calibração, aumentando a robustez das previsões. Com base nesses resultados, é possível definir estratégias mitigadoras e implementar medidas corretivas voltadas à manutenção da estabilidade estrutural das pilhas e à minimização dos impactos ambientais associados à disposição dos rejeitos.

#### **3.1. Planejamento e Amostragem**

A metodologia de amostragem deve seguir uma abordagem sistemática, embasada em normas técnicas reconhecidas, incluindo diretrizes da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O plano de amostragem é estruturado para abranger a variabilidade espacial e estratigráfica do material, considerando as diferentes zonas da pilha – superiores, intermediárias e basais – e as condições do rejeito no ponto de geração. A amostragem pode ser realizada tanto na estrutura final de deposição quanto na saída do processo, sendo que, no caso de rejeitos filtrados, a coleta deve ocorrer na saída do sistema de filtração. A escolha do local deve considerar os objetivos do estudo, garantindo que os dados obtidos representem com fidelidade as características do material ao longo de sua deposição.

A coleta é realizada com equipamentos apropriados para rejeitos, assegurando a preservação das características físicas e químicas do material. O volume e a frequência das amostras são definidos conforme as normas de referência, de modo a garantir a representatividade estatística dos dados. Para controle da incerteza analítica, são obtidas amostras replicadas, permitindo a avaliação da variabilidade dos resultados.

Além disso, deve ser implementado um plano de controle e garantia da qualidade (QA/QC). Esse plano inclui a inserção de amostras de controle, análises em branco e o uso de padrões certificados, permitindo a verificação da precisão e exatidão das análises laboratoriais, bem como a identificação de eventuais desvios nos resultados..

#### **3.2. Análise Química**

A determinação quantitativa dos elementos presentes nos rejeitos é realizada tanto para as frações totais quanto para as frações solúveis, visando caracterizar a disponibilidade e o potencial de mobilização desses elementos no ambiente. Para a análise da fração total, utilizam-se técnicas

de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), precedidas de digestão ácida. Esse procedimento assegura a extração eficiente dos elementos da matriz sólida, permitindo uma avaliação da composição química global do rejeito.

Paralelamente, a fração potencialmente disponível para mobilização é investigada por meio de testes de lixiviação parcial, que emprega digestão ácida para quantificar os elementos passíveis de liberação sob condições ambientais específicas. Além disso, são conduzidos testes de extração sequencial, que permitem identificar a associação dos elementos a diferentes fases do rejeito (solúvel, trocável, ligada a óxidos de ferro e manganês, matéria orgânica, entre outras). Esses ensaios são úteis para prever o comportamento geoquímico dos rejeitos em cenários ambientais variados, subsidiando a modelagem do transporte e a estimativa de impactos potenciais.

### **3.3. Análise Mineralógica**

A caracterização mineralógica é realizada principalmente por Difração de Raios X (XRD), com análise dos padrões difratométricos via métodos como o refinamento de Rietveld para quantificação das fases minerais presentes. Complementarmente, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Análise por Dispersão de Energia (EDS) é empregada para a investigação da morfologia e composição elementar em escala microscópica, permitindo a identificação de minerais com baixa difração e a análise de interfaces e heterogeneidades da matriz.

### **3.4. Análise Estatística e Integração dos Dados**

Os dados obtidos das análises químicas e mineralógicas são submetidos a um rigoroso tratamento estatístico, que inclui a aplicação de medidas de tendência central, dispersão e análise de distribuição (quartis e intervalos interquartílicos) para identificação de valores anômalos (*outliers*) e avaliação da variabilidade intrínseca. Os resultados são integrados a modelos conceituais e numéricos, possibilitando a simulação dos processos de percolação, interação água-rocha e evolução da qualidade da drenagem, considerando a influência dos parâmetros geotécnicos (densidade, porosidade, compactação) e das trajetórias de fluxo.

A caracterização detalhada dos rejeitos fornece subsídios quantitativos e qualitativos para a inserção em modelos hidrogeoquímicos numéricos. Os dados integrados orientam a identificação dos mecanismos de dissolução, precipitação e transporte dos elementos, permitindo a análise de sensibilidade e calibração. Posteriormente estas informações podem orientar a estratégias mitigadoras e a implementação de medidas corretivas para assegurar a estabilidade estrutural e minimizar os impactos ambientais decorrentes da disposição dos rejeitos.

## **4. MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOQUÍMICA**

Para prever a qualidade dos efluentes, a WST utiliza modelagem numérica para avaliar a saturação de diferentes fases minerais em função das condições hidroquímicas. O modelo considera as principais fases minerais presentes na matriz sólida e os processos geoquímicos que regulam sua dissolução e precipitação, incluindo interações com a solução aquosa, alterações na mobilidade dos elementos químicos e sua consequente liberação nos efluentes.

### **4.1. Estruturação e Parametrização**

O modelo numérico é estruturado para representar, em uma abordagem unidimensional, o transporte reativo de água e solutos dentro da matriz porosa. A modelagem baseia-se na discretização do meio em células, permitindo a simulação da evolução composicional ao longo da profundidade. Cada célula é parametrizada com base nas características do meio, como porosidade, permeabilidade e condutividade hidráulica. O fluxo de água é modelado considerando diferentes condições de saturação, utilizando a equação de Darcy para meios saturados e a formulação de van Genuchten para a zona não saturada. O transporte de solutos é descrito pelos processos de advecção e dispersão, enquanto as reações químicas são incorporadas por meio de equilíbrios termodinâmicos e processos cinéticos, incluindo dissolução e precipitação mineral, além de adsorção e sorção em superfícies reativas.

## **4.2. Estimativa do Tempo de Residência**

O tempo de residência da solução no meio é estimado utilizando métodos estatísticos de análise de séries temporais, permitindo a identificação de padrões de fluxo e transporte. A correlação cruzada entre séries de precipitação e escoamento pode ser utilizada para estimar os tempos de resposta do sistema, sendo a significância estatística determinada com um nível de confiança adequado (Padilla & Pulido-Bosch, 1995).

## **4.3. Dados de Entrada e Cálculo dos Índices de Saturação**

Os dados hidroquímicos são utilizados para definir as condições iniciais das soluções aquosas e parametrizar o modelo, considerando as concentrações de elementos majoritários e traços, além de características físico-químicas como pH, potencial redox, temperatura e condutividade elétrica. A modelagem possibilita o cálculo dos índices de saturação mineral, permitindo identificar fases que tendem a permanecer estáveis, dissolver-se ou precipitar nas condições avaliadas. Além disso, são considerados os efeitos da troca iônica e da complexação de metais com ligantes dissolvidos na solução (Parkhurst & Appelo, 2013).

## **4.4. Modelagem da Biodegradação**

A modelagem incorpora a biodegradação de compostos orgânicos utilizando abordagens baseadas em cinéticas microbianas, considerando a disponibilidade de nutrientes e a atividade biológica. Essa modelagem é particularmente útil para avaliar a degradação de compostos orgânicos provenientes dos reagentes utilizados no beneficiamento de minério de ferro. A cinética R-Monod é utilizada para descrever a taxa de consumo do substrato em função da disponibilidade de nutrientes essenciais para a atividade microbiana (Chaves, 2001). Os dados de monitoramento auxiliam na validação dos resultados e na interpretação dos processos que influenciam a composição química da solução, permitindo a comparação entre os valores simulados e os observados.

## **4.5. Colmatação de drenos de fundo**

A metodologia de colmatação química envolve a estimativa do potencial de colmatação do sistema de drenagem, considerando a geometria dos drenos, a porosidade dos materiais de preenchimento e a vazão da água nos drenos (Sterpejkowicz-Wersocki, 2014). Para isso, são utilizados dados sobre a área das seções transversais, o comprimento dos drenos e a vazão, que permitem calcular o volume de espaços vazios disponíveis para precipitação. O modelo numérico simula o equilíbrio da solução com a atmosfera, determinando a quantidade de material precipitado, como os óxi-hidróxidos de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), o que contribui para a colmatação dos drenos ao longo do tempo. Este cálculo fornece informações essenciais sobre a eficiência do sistema de drenagem e a previsão de possíveis obstruções, orientando o gerenciamento e a operação da drenagem.

## **4.6. Calibração e Simulações**

O modelo é ajustado iterativamente por meio da calibração dos parâmetros de transporte e reatividade química, garantindo a melhor representatividade dos processos geoquímicos envolvidos. São realizadas simulações sob diferentes cenários para prever a evolução da composição química da solução ao longo do tempo, considerando variações nas condições ambientais, alterações no fluxo de água, mudanças no pH e a introdução de novas fontes de solutos. Os resultados fornecem suporte para a interpretação dos processos que controlam a qualidade da água e as tendências de precipitação e dissolução mineral, contribuindo para a compreensão da dinâmica geoquímica do sistema estudado.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados da análise das pilhas compartilhadas de estéril e rejeito no Quadrilátero Ferrífero (QF) indicam que, de forma geral, os estéreis apresentam uma assembleia mineralógica mais diversa do que os rejeitos, o que pode influenciar a dinâmica geoquímica e hidroquímica do sistema. As pilhas compostas por rejeito têm uma composição mineralógica predominantemente

inerte, com minerais como quartzo e óxidos de ferro (hematita, goethita e magnetita) que conferem boa estabilidade sob condições de oxidação.

A caracterização hidroquímica das águas que interagem com as pilhas compartilhadas revela padrões distintos entre as fases de entrada e saída. As mudanças nas condições redox ao longo do perfil da pilha afetam as concentrações de ferro e manganês dissolvidos, sendo influenciadas pela degradação de compostos orgânicos utilizados no beneficiamento. A precipitação de óxi-hidróxidos de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) e manganês ocorre sob condições oxidantes, enquanto o ferro e o manganês são liberados em condições redutoras, comuns no interior das estruturas.

A modelagem numérica hidrogeoquímica fornece uma visão detalhada do transporte de solutos e da degradação dos reagentes. O modelo incorpora diferentes fases minerais, como quartzo e óxidos de ferro, para simular o comportamento dos elementos ao longo do tempo. Os resultados indicaram que a interação com a atmosfera, especialmente no que diz respeito à precipitação, influencia significativamente a dinâmica de drenagem, com picos de fluxo associados a eventos de chuva.

Em relação à colmatção, a maior parte da precipitação ocorre fora do sistema de drenagem, minimizando os impactos na eficiência da drenagem. Esse comportamento sugere que, embora o risco de colmatção ao longo do tempo seja baixo, os efeitos sobre a eficiência da drenagem são limitados. Dessa forma, o modelo numérico, aliado ao monitoramento contínuo dos drenos, pode servir como uma ferramenta eficaz para a gestão da estabilidade e viabilidade ambiental das pilhas compartilhadas de estéril e rejeito, garantindo que o sistema de drenagem continue funcionando de maneira eficiente com impactos ambientais mínimos.

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo adota uma abordagem interdisciplinar para enfrentar as complexidades ambientais no gerenciamento de pilhas de rejeitos, integrando diversas áreas do conhecimento, como geoquímica, geotecnia, hidrogeologia, hidrologia e demais áreas correlatas. A modelagem hidrogeoquímica empregada para o prognóstico da qualidade dos efluentes de estruturas geotécnicas simula as interações entre a água e materiais geológicos (rejeitos e estéréis de mina), com foco na degradação de compostos químicos utilizados no processo de beneficiamento e nos processos de precipitação, dissolução de minerais e fenômenos de sorção. As principais conclusões incluem a predominância de minerais inertes nos rejeitos, com tempo de residência de água limitado, o que reduz a dissolução de minerais. A degradação dos compostos orgânicos é influenciada pelas condições ambientais, resultando na formação de produtos de degradação com baixo impacto ambiental. As simulações indicam que os compostos orgânicos se degradam rapidamente e não representam riscos significativos para o meio ambiente. A metodologia apresentada oferece um modelo robusto para a análise e gerenciamento das incertezas, apoiando práticas de gerenciamento seguro das pilhas de rejeitos ao longo do ciclo de vida das instalações.

## REFERÊNCIAS

- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2021) Manual de gerenciamento de áreas contaminadas [recurso eletrônico] / CETESB ; Organizadores [e] revisores Elton Gloeden, André Silva Oliveira, Fernando Ricardo Scolamieri Pereira. - - 3.ed. - - São Paulo.
- CHAVES, L. C. (2001) Estudo de Resíduos de Sólidos Gerados na Flotação de Minério de Ferro: Quantificação e Decomposição de Aminas no Meio Ambiente. Universidade Federal de Ouro Preto. (Mestrado em Geodinâmica Superficial/ Geoquímica Ambiental). Dissertação de Mestrado, 89p.
- ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (2020). GLOBAL INDUSTRY STANDARD ON TAILINGS MANAGEMENT (gistm). Global Tailings Review, 40p.
- PADILLA, A; PULIDO-BOSCH, A. (1995). Study of hydrographs of karstic aquifers by means of

correlation and cross-spectral analysis. J Hydrol, n.168, p73-89.

STERPEJKOWICZ-WERSOCKI, Witold. (2014) Problem of Clogging in Drainage Systems in the Examples of the Żur and Podgaje Dams. Archives Of Hydro-Engineering And Environmental Mechanics, Gdańsk, v. 61, n. 3-4, p. 183-192. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/heem-2015-0012>.