



MODELAGEM HIDROGEOQUÍMICA CONCEITUAL E NUMÉRICA DE PILHAS DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO – QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Rafael Albuquerque ¹, Carolina Abreu ¹, Mariana Werle ¹, Lara Lange ¹, Eduardo Costa ¹

¹Water Services and Technologies. Rua Bernardo Figueiredo, 33. Belo Horizonte (MG).
rafael.albuquerque@waterservicestech.com, carolina.abreu@waterservicestech.com,
mariana.werle@waterservicestech.com, lara.lange@waterservicestech.com,
eduardo.costa@waterservicestech.com.

Palavras-Chave: PHREEQC; termodinâmica; cinética

INTRODUÇÃO

Diante dos rompimentos das barragens de rejeito de minério de ferro, em 2015 e 2019, há uma demanda por práticas mais seguras e ambientalmente responsáveis de disposição desses materiais. O descomissionamento de barragens motivou a utilização de estruturas alternativas, como as pilhas de disposição de estéril e rejeito drenado (PDER). Há, a princípio, menor risco de falha hidráulica associada às PDERs por elas possuírem menor volume de água armazenada. Em função do contexto, as PDERs vêm sendo objeto de escrutínio por parte do poder público. Além das questões relacionadas à estabilidade geotécnica, busca-se compreender o potencial de liberação de carga química por essas estruturas.

O presente trabalho é resultado de experiências obtidas por meio de estudos hidrogeoquímicos realizados em uma PDER em operação, bem como estudos preditivos a partir de projetos de estruturas, todos em Minas Gerais. O objetivo é apresentar alguns dos principais aspectos dos modelos hidrogeoquímicos conceituais das PDERs desenvolvidos. Também são apontadas diretrizes para o desenvolvimento de modelos numéricos preditivos da composição química das drenagens oriundas dessas estruturas.

METODOLOGIA

Os trabalhos envolveram as seguintes etapas: revisão da geologia local, do projeto geotécnico da estrutura e dados hidroquímicos, modelagem hidrogeológica da pilha, ensaios laboratoriais, modelagem hidrogeoquímica conceitual e modelagem numérica de transporte 1D envolvendo termodinâmica e cinética de reações com o PHREEQC (Parkhurst e Appelo, 2013). Os ensaios foram realizados em amostras de rejeito e estéril. Análises incluíram mineralogia (por DRX e MLA), litogeoquímica (em diferentes aberturas), granulometria e, ocasionalmente, ensaios cinéticos com célula úmida. Os modelos hidrogeoquímicos foram todos calibrados em relação às suas concentrações finais simuladas nas soluções. Utilizou-se como dados observados a composição hidroquímica monitorada na saída de pilhas ou resultados de ensaios.

PRINCIPAIS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises demonstraram que os rejeitos são formados majoritariamente por óxidos de ferro e sílica, com silicatos (principalmente clorita e caolinita) subordinados. Em nenhuma amostra de rejeito foram detectados sulfetos. Os estéreis possuem composição heterogênea, uma vez que eles são oriundos de diferentes unidades litológicas (principalmente do Supergrupo Minas). Numa minoria de amostras de estéril, foi detectado sulfeto em baixo teor (até 0,5%). Dados de monitoramento hidroquímico apontam os seguintes parâmetros em maiores concentrações nas saídas das pilhas: ferro, manganês e série nitrogenada.

A mobilização de ferro na drenagem se dá principalmente pela dissolução de óxidos de ferro presentes no rejeito. Esta reação se dá em meio redutor (Appelo & Postma, 2005). A mobilização de manganês ocorre pela dissolução de óxido de manganês (quando presente), também em meio redutor, e/ou pelo intemperismo de clorita rica em manganês. As condições redutoras no interior das pilhas podem ser evidenciadas em



campo pela observação de precipitado alaranjado $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ nas saídas dos drenos de fundo, formado em decorrência do efluente redutor, rico em ferro dissolvido, entrando em contato com a atmosfera (oxidante).

No contexto apontado, análises preditivas das concentrações de ferro e manganês nas saídas das estruturas passam necessariamente por estimar as condições redox da pilha. As potenciais reações redutoras identificadas são: a) degradação de compostos orgânicos (como as aminas), utilizadas no beneficiamento do minério, que formam amônia, nitrito e nitrato como produtos da reação; b) redução promovida por matéria orgânica no fundo da pilha, em função da interação da drenagem com o solo, e c) oxidação de sulfetos e consequente redução do meio, ocasionalmente, quando estes estão presentes nos estéreis. Já o fato das PDERs operarem com baixa umidade, portanto, em meio insaturado em termos hidrogeológicos, facilita o ingresso de oxigênio ao interior das estruturas por difusão, dificultando a formação de meio redutor. Por consequência, o redox do meio é controlado por: a) taxa de difusão de oxigênio para o interior da pilha, que torna o meio oxidante, com menos liberação de ferro e manganês, e b) cinética das reações redutoras supracitadas, que tornam o meio redutor e estimulam a mobilização de ferro e manganês.

A utilização de ensaios de previsão de drenagem ácida de mina, como os ensaios cinéticos, pode subestimar as concentrações previstas em solução. Estes ensaios foram desenvolvidos para simular oxidação de sulfetos. Portanto, eles podem não ser capazes de simular condições redutoras análogas às das pilhas. Por consequência, o desenvolvimento de modelos conceituais e numéricos robustos se faz particularmente relevante. As seguintes recomendações são apontadas para o desenvolvimento de modelos numéricos hidrogeoquímicos: a) devem ser desenvolvidos em ferramenta que permita simular termodinâmica e cinética de reações associadas ao fluxo, como os modelos 1D do PHREEQC, ou equivalente. São válidas tentativas em modelos acoplados em 2D ou 3D com ferramentas como MODFLOW e FEFLOW; b) simular o redox do meio, envolvendo difusão de oxigênio (em função da saturação do meio) e a cinética das reações redutoras; c) simular reações lentas, como intemperismo de silicatos, por meio de cinética, utilizando formulações matemáticas como as de Palandri e Kharaka (2004), para não superestimar essas reações; d) sempre que possível, calibrar (*history matching*) a solução final simulada em relação às concentrações observadas nas saídas de drenos de fundo de estruturas análogas, e e) ajustar a calibração do modelo com base em parâmetros menos comuns de serem medidos, como a pressão parcial de CO_2 e parâmetros que controlam a cinética das reações, como a relação área/volume da superfície de cada mineral (A0/V). A utilização de modelos hidrogeológicos para suportar a modelagem hidrogeoquímica é recomendada, pois permite estimar o tempo de contato (residência) da água com os materiais (dado de entrada para simulação de cinética) e a saturação do meio não-saturado (que controla a difusão de oxigênio para o interior da pilha).

CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste estudo aborda as complexidades ambientais e operacionais das PDERs, integrando diversas áreas do conhecimento, em especial a geoquímica e a hidrogeologia. Busca-se contribuir para a compreensão dos processos relevantes nas novas estruturas de deposição de rejeito, para que análises preditivas e medidas de controle associadas possam ser implementadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appelo, C.A.J. e Postma, D..Geochemistry, Groundwater and Pollution. 2nd Edition, Balkema, Rotterdam. 2005.
- Palandri, J.L. e Kharaka, Y.K., J. A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling. U.S. Geological Survey Open File Report (OF 2004-1068). 2004.
- Parkhurst, D.L. e Appelo, C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p. 2013.