



PREDIÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS POR ENSAIOS ESTÁTICOS E CINÉTICOS

JÚNIOR, O.M.M.¹, JÚNIOR, L.U.B.¹, DUARTE, M.H.R.¹, MEIER, S.F.A.¹

¹Mineração Maracá Indústria e Comércio (MMIC), Departamento de Meio Ambiente, Laboratório Geoquímico.

RESUMO

Considerada como grande passivo ambiental, a drenagem ácida de minas (DAM) está presente em minerações que apresentam minerais sulfetados expostos às condições atmosféricas, água e oxigênio. Tal exposição favorece a oxidação do enxofre, que resulta em uma solução com pH baixo e elevadas concentrações de metais. Com o intuito de avaliar o potencial de geração da DAM em uma mineradora de ouro e cobre localizada ao norte do estado de Goiás, foram realizados ensaios estáticos e cinéticos, para analisar amostras de estéreis e rejeitos de diferentes localizações. Os ensaios estáticos consistem na predição do potencial de geração da acidez das amostras, por meio do poder de acidificação e neutralização, enquanto os ensaios cinéticos objetivam-se em determinar quando ocorrerá a geração da DAM, mediante ao método de colunas de lixiviação que simula de forma acelerada a disposição dos minérios em pilhas. Noventa e duas amostras de diferentes porções de pilhas de esteril e rejeito foram inseridas nas colunas, realizando-se mensalmente análises de vinte e dois parâmetros físico-químicos do lixiviado de cada coluna. Os resultados mostraram a eficiência nos métodos de predição, estáticos e cinéticos, confirmando o potencial e o período de geração da DAM e as concentrações de metais dissolvidos.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem ácida de minas, Métodos de predição, Ensaios estáticos e cinéticos.

ABSTRACT

Considered as a major environmental liability, acid mine drainage (DAM) is present in mining sites with sulphide minerals exposed to atmospheric, water and oxygen conditions. Such exposure favors the oxidation of sulfur, which results in a solution with low pH and high concentrations of metals. In order to evaluate the potential for the generation of DAM in a gold and copper mining, static and kinetic tests were carried out to analyze samples of waste rock and tailings from different locations. Static tests consist of the prediction of the acidity generation potential of the samples, through the acidification and neutralization power, while the kinetic tests are aimed at determining when the generation of AMD will occur, through the leach column method that simulates the disposal of ores in stacks. Ninety-two samples of different portions of the mine were inserted into the columns, and monthly analyzes of twenty-two physical-chemical parameters of the leachate from each column were carried out. The results showed the efficiency in the static and kinetic prediction methods, confirming the potential and the generation period of the AMD and the concentrations of dissolved metals.

KEYWORDS: Acid mine drainage, Methods of prediction, Static and kinetic tests.

1. INTRODUÇÃO

Em um empreendimento de mineração são produzidos minérios de cobre e ouro através da lavra à céu aberto. A presença do cobre está associada diretamente com a calcopirita, sulfeto de cobre. Além desse mineral, a geologia local indica a presença de pirita e de carbonatos como a calcita. Contudo, as características mineralógicas fazem desta mina local propício para a geração da drenagem ácida de minas, DAM.

A drenagem ácida de minas é um dos principais passivos ambientais enfrentados pelas atividades minerárias, por possuírem características de degradação da qualidade das águas superficiais, subterrâneas, solos e sedimentos (Zaiat, 2003). A drenagem ácida é produzida em geral pela oxidação natural dos minerais de sulfetos à ácido sulfúrico e solubilização dos metais pesados (Zaiat et. al., 2000). Além disso, essa solução rica em sulfato é caracterizada por baixo pH, alta condutividade, altas concentrações de metais como Al, Fe, Mn e possui alta capacidade de lixiviar os elementos presentes no minério (Rodríguez, 2012).

Identificar o potencial de geração da DAM anterior as etapas de lavra e beneficiamento, é fundamental para definir e implantar estratégias de gerenciamento e controle da drenagem ácida (Nordstrom, 2003). Tais estratégias são de extrema importância, pois evitam investimentos futuros em projetos e execução de fechamentos de pilhas, bem como alternativas de controle e tratamento desse passivo ambiental (Gallinger, 2010). Além disso, o custo de gerenciamento preventivo da drenagem ácida é inversamente proporcional ao tempo das atividades, ou seja, o quanto antes for identificado o potencial da DAM, maiores são as opções de controle e tratamento com um menor custo (Miller, 1998).

Bernardes e Mansur 2011, utilizaram os ensaios estáticos de acordo com a metodologia MABA para prever a geração da DAM de diferentes amostras de uma mineração de carvão no estado de Santa Catarina. Após concluírem a eficiência da predição da DAM pelos ensaios estáticos, realizaram-se experimentos com colunas de lixiviação para comprovar os resultados. Os estudos demonstraram que é possível identificar o tempo de geração de acidez e que as atividades microbiológicas influenciam positivamente na oxidação dos minerais sulfetados. Da mesma forma, Gautama e Kusuma 2008, comprovaram a predição da DAM pelos ensaios estáticos e cinéticos. Segundo a metodologia MABA, foi identificado o potencial de geração da drenagem ácida de uma mina de carvão na Indonésia, e posteriormente realizou-se os ensaios cinéticos pelos métodos de colunas. Os autores concluíram que os ensaios estáticos foram suficientes para caracterizar o potencial de geração da drenagem ácida e que os ensaios cinéticos forneceram informações para melhorar a prática de controle e gestão da DAM.

Com o intuito de identificar e avaliar o potencial de geração da drenagem ácida de minas em um empreendimento de mineração localizado ao norte do estado de Goiás, foi realizado uma predição utilizando ensaios estáticos e cinéticos. Os ensaios estáticos foram realizados de acordo com a metodologia MABA (Balanço ácido base modificado), enquanto os cinéticos, utilizaram o método de coluna de lixiviação segundo metodologia australiana EGI, *Environmental Geochemistry International*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios estáticos objetivam-se em avaliar o potencial de geração de acidez de uma amostra, que são utilizados na primeira etapa para a determinação da drenagem ácida. O método estabelece o balanço entre os minerais que tem potencial de geração de acidez e outros que tem capacidade de consumir acidez (Brodie *et. al.* 1991). Os ensaios estáticos foram realizados de acordo com o método MABA (balanço ácido base modificado).

O método MABA desenvolvido por Lapakko (1996), foi uma modificação do método ABA padrão, que estima o potencial de acidez (PA) em relação a quantidade de enxofre da amostra e o potencial de neutralização (PN) pelo teste do “fizz”.

O potencial de geração de acidez, é a quantidade de ácido gerado por uma amostra através da oxidação do sulfeto. Para a determinação do PA, determinada quantidade da amostra é colocada em contato com peróxido de hidrogênio, (H₂O₂) a 15 % com intuito de oxidar a quantidade de enxofre presente. Após a reação, é medido o pH e posteriormente a amostra é submetida a titulação com hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 mol até o pH 4,5 e 7,0, registrando os volumes titulados.

O método utilizado para predizer o potencial de neutralização tem como objetivo quantificar as concentrações de bases presentes na amostra para neutralizar o ácido sulfúrico (H₂SO₄), possivelmente formado pela oxidação dos sulfetos. Esse procedimento é realizado à temperatura ambiente e a amostra fica exposta a solução ácida por 24 horas. A amostra a ser analisada é submetida ao ataque com ácido clorídrico (HCl), com o intuito de estimar a quantidade de carbonato, essa reação dos carbonatos com ácido, resulta em uma efervescência que emite ruídos que será avaliada pelo método “fizz”. A Tabela 1 exibe a classificação do método *fizz* de acordo com a reação do ácido clorídrico com o carbonato presente na amostra (Stewart e Miller, 2006). De acordo com a avaliação visual e auditiva, é classificado o “Fizz” e posteriormente é definido a molaridade e volume de HCl a ser adicionado na amostra.

Tabela 1. Tabela de classificação do *fizz*, molaridade e volume de HCl para estimar o PN da amostra.

Reação	Classificação “Fizz”	HCl Molaridade (M)	Vol (ml)	NaOH Molaridade (M)
Sem reação	0	0.5	4	0.1
Pequena reação	1	0.5	8	0.1
Reação moderada	2	0.5	20	0.5
Reação forte	3	0.5	40	0.5
Reação muito forte	4	1	40	0.5

Fonte: Adaptado de Stewart e Miller (2006).

Posterior ao ensaio, determinada quantidade da amostra é colocada em contato com volume definido de HCl pelo método “fizz”, por 2 horas e sob agitação, e em seguida é titulado uma solução de hidróxido de sódio, NaOH, até o pH 7.

Por sua vez, os ensaios cinéticos visam acelerar as condições ambientais naturais, provenientes da precipitação da chuva, incidência solar e oxigênio e ação de bactérias oxidantes (Miller, 1998). Esse procedimento consiste na geração da DAM pela rápida oxidação

dos sulfetos que é realizada através dos ensaios de colunas de lixiviação. Os ensaios de colunas são realizados de acordo com a metodologia Australiana EGI. A incidência solar é simulada em laboratório através de lâmpadas incandescentes infravermelho, que são ligadas diariamente durante o período de 8 horas. Os períodos úmidos são analisados através da adição de água deionizada semanalmente, e ao final da quarta semana do ensaio é adicionada uma quantidade quatro vezes maior de água e realiza-se a coleta do lixiviado para realização das análises.

Para o experimento laboratorial dos ensaios cinéticos de colunas foram utilizados funil de PVC do tipo buchner com dimensão interna de 240mm e 3,7L de capacidade, filtro de papel de 160mm de diâmetro, lâmpadas de aquecimento infravermelho de 150W, frascos para coleta de amostras de 1L, bancada de suporte das colunas, fonte de energia e água deionizada.

Os filtros de papel de 160mm foram colocados na base dos funis de buchner a fim de impedir a passagem de material para os frascos de coleta do lixiviado. Posteriormente, pesou 2 quilogramas de cada amostra e as inseriram nos funis. Por fim, o conjunto coluna, filtro e amostra foram pesados e tiveram seus valores registrados. A Figura 1 mostra a estrutura física do laboratório Geoquímico para realização dos testes de colunas.



Figura 1. Imagens das colunas de lixiviação no Laboratório Geoquímico.
Fonte: Do autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios Estáticos

Os ensaios estáticos foram realizados em 92 amostras, sendo 76 amostras de estéreis e 16 de rejeitos. Os resultados indicaram que 78 amostras tiveram potencial de geração da drenagem ácida de minas, consistindo em 11 amostras de rejeitos e 66 de estéreis. As análises realizadas tiveram um teor de corte de PN/PA de 1, ou seja, amostras com valores de PN/PA abaixo de 1 são caracterizados como geradores ou potencialmente geradoras de acidez (PAG) e amostras com resultados acima do estabelecido, consideradas não geradores (NAG).

Os resultados de PA foram obtidos através do teor de enxofre das amostras enquanto que o PN foi alcançado de acordo com os volumes de HCl e NaOH titulados. Dessa maneira, foi possível obter a relação PN/PA e caracterizar as amostras como geradoras e não geradoras de drenagem ácida.

A Figura 2 apresenta o gráfico de PN/PA das 92 amostras. A linha horizontal representa o teor de corte PN/PA igual a 1.

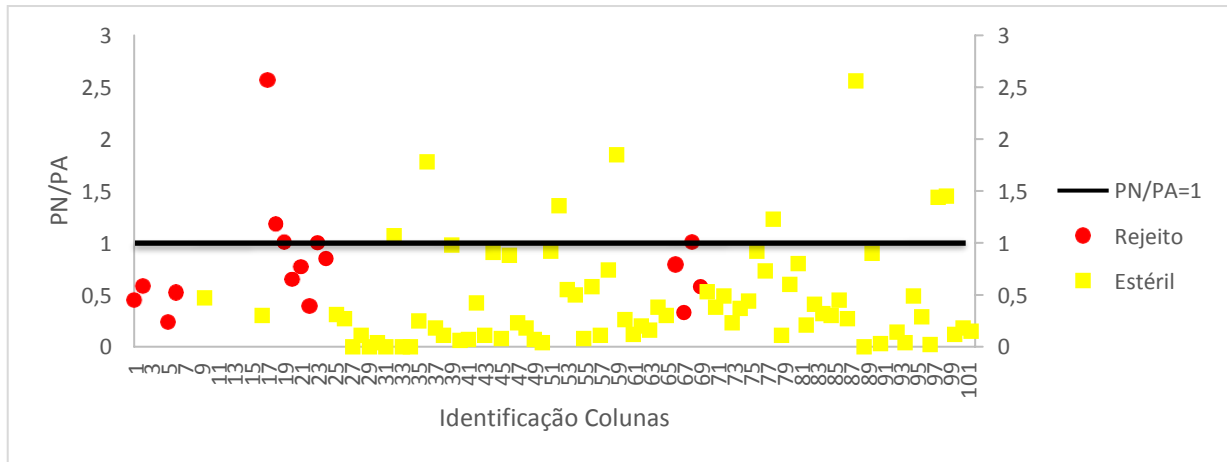


Figura 2. Resultado ensaio de estático com amostras das colunas de lixiviação.

A Figura 2, ilustra os valores de PN/PA das amostras que foram submetidas aos ensaios de colunas de lixiviação. Observa-se que apenas 14 das 92 colunas, ficaram acima da linha de teor de corte, ou seja, 15% das amostras foram caracterizadas como não geradoras (NAG), sendo 5 amostras de rejeito e 9 de estéril. Amostras consideradas potencialmente geradoras de acidez foram 78, sendo 11 de rejeito e 67 de estéril. No geral, as amostras PAG apresentaram maiores teores de enxofre visto que são minérios mais rico em calcopirita.

3.2. Ensaios Cinéticos

Com o intuito de confirmar os ensaios estáticos e obter o tempo de geração da drenagem ácida, foram realizados ensaios cinéticos pelo método de colunas de lixiviação de todas as 92 amostras analisadas. As amostras foram inseridas no experimento de forma gradativa, 5 amostras inseridas em 2012, seguida por 19 inseridas em 2015 e 68 amostras inseridas em 2016.

Até o momento realizou-se 82 ciclos, perfazendo um total de 6 anos e 10 meses, onde cada ciclo equivale ao período de um mês do experimento. Cada ciclo é composto por 4 semanas sendo que na última semana é coletado o extrato lixiviado de todas as colunas e enviado para o laboratório credenciado para análise química. Os parâmetros analisados são: pH, alcalinidade, acidez, condutividade, Al, As, Ba, Cd, Ca, Pb, Co, Cu, Fe, P, Mg, Mo, Ni, K, Se, Na, SO_4 e Zn.

A avaliação foi realizada através da análise gráfica dos parâmetros acima obtidos. Para caracterizar a geração de drenagem ácida, observou-se a redução do pH e o aumento nas concentrações de metais e condutividade elétrica. Para as amostras consideradas como não geradoras, por mais que houve redução do pH e aumento nas concentrações dos metais, esses níveis ficaram dentro do padrão estabelecido pela norma regulamentadora, CONAMA 357.

Os experimentos de colunas mostraram que 76 colunas, ou seja 83%, demonstraram geração de drenagem ácida, sendo 65 amostras de estéreis e 11 de rejeito. A Tabela 2 correlaciona a quantidade de colunas que geraram drenagem ácida a partir do ano de 2016 de acordo com os litotipos das amostras.

Tabela 2. Resultado experimental das colunas de lixiviação.

Litotipos	Nº Colunas	Geração DAM 2016	Geração DAM 2017	Geração DAM 2018	Colunas geradoras	Não geradoras	Colunas de DAM %
ANX	31	8	19	1	28	3	90%
ANX-BTO	1	1	0	0	1	0	100%
ANX-SRT	1	1	0	0	1	0	100%
BTO	22	11	6	0	17	5	77%
GNS	6	0	4	0	4	2	67%
GNS-BTO	1	1	0	0	1	0	100%
GNS-SRT	1	1	0	0	1	0	100%
OXI	1	0	0	0	0	1	0%
QDPB	5	3	1	0	4	1	80%
Rejeito	16	3	7	2	12	4	75%
SRT	7	5	2	0	7	0	100%
Total	92	34	39	3	76	16	83%

Fonte: Do autor.

Observa-se que através da Tabela 2 é possível identificar os litotipos mais reativos e o período necessário para a geração da drenagem ácida. Como demonstrado, das 31 amostras de anfibólio (ANX), 28 geraram acidez, ou seja, 90% de todo material. Da mesma forma, pode ser analisado a sericita (SRT), material que teve 100% das amostras com formação de acidez. Nota-se a elevada reatividade desse litotipo, aproximadamente 72% das amostras demonstraram geração de drenagem ácida nos primeiros 12 ciclos, ou seja, no primeiro ano de exposição em pilhas de estéreis.

Era esperado que todas as amostras de rejeito fossem consideradas não geradoras de acidez, ou seja, NAG. Porém, das 16 amostras, 12 geraram drenagem ácida, que significa que o elevado teor de enxofre das amostras não se oxidou por completo.

Afim de comparar a reatividade dos minérios das cavas sul e norte de uma mineração foi realizado uma caracterização do potencial de acidez das amostras, isto é, das 32 amostras provenientes da cava sul, 78% geraram drenagem ácida. Dessas aproximadamente 65% ocorreram nos primeiros 5 ciclos, equivalente aos 5 anos de exposição em pilhas de estéreis. Diferentemente das amostras resultantes da cava norte, em que 100% geraram drenagem ácida, porém apenas 20% ocorreram nos primeiros 5 ciclos do experimento, concluindo a menor reatividade desses materiais comparados com os da cava sul.

4. CONCLUSÕES

Os resultados da predição da drenagem ácida de minas por ensaios estáticos e cinéticos de uma mineradora localizada ao norte de Goiás, demonstraram ser eficazes e de grande importância para a gestão do monitoramento da drenagem ácida. Para a definição do potencial de geração da DAM é fundamental que os ensaios estáticos sejam complementados pelos ensaios cinéticos, que neste caso estão em desenvolvimento desde 2012. A identificação de amostras geradoras exigiram conhecimento da cinética da reação de oxidação do sulfeto, uma vez que o mesmo é convertido a sulfato e utilizado na precipitação dos metais, motivo pelos quais são observados elevadas concentrações de metais dissolvidos e alta condutividade elétrica.

As amostras provenientes da cava sul, mostraram ser mais reativas, gerando rápida acidez nos primeiros ciclos do experimento. No geral, o teor médio de enxofre das amostras da cava sul foi o maior do complexo da unidade e o litotipo sericita, foi o de maior potencial de geração da drenagem ácida.

Espera-se com base nesses resultados, identificar e avaliar materiais considerados NAG, para cobertura de pilhas de estéreis em fechamento, propor alternativas de controle e tratamento da drenagem ácida de minas e avaliar a possibilidade de disposição dos estéreis por tempo de geração da DAM.

5. REFERÊNCIAS

Bernardes SCM, Mansur MB. Modelling of acid mine drainage (AMD) in columns. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 2011; 425-7.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 357, de 17/03/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Brodie MJ, Broughton LM, Robertson AM. A Conceptual Rock Classification System for Waste Management and a Laboratory Method for ARD Prediction from Rock Piles. In *Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage* 1991;119-16.

Gallinger R, Fleury AM. The Global Acid Rock Drainage Guide. International Network Acid Prevention-INAP [Internet] 2010. Disponível em: <http://www.gardguide.com>

Gautama RS, Kusuma GJ. Evaluation of Geochemical Tests in Prediction Acid Mine Drainage Potential in Coal Surface Mine. *International Mine Water Association Conference* 2008; 48-4.

Lapakko K. Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humidity cell. *American Society for Testing and Material* 1996.

Miller, SD. *Predicting acid drainage*. 1a ed. Australia: Australian Minerals and Energy Environment Foundation; 1998.

Nordstrom DK. Effects of Microbiological and Geochemical Interactions in Mine Drainage. *Environmental Aspects of Mine Wastes* 2003; 227-11.

Rodriguez RP. Assessment of a UASB reactor for the removal of sulfate from acid mine water. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2012; 45-10.

Stewart WA, Miller SD, Smart R. Advances in Acid Rock Drainage (ARD) Characterization of Mine Wastes. *IWMA* 2006;0-22.

Zaiat, M. *Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias*. 1ª ed. Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2003.

Zaiat M, Rodrigues JAD, Foresti E. External and internal mass transfer effects in an anaerobic fixed-bed reactor for wastewater treatment. *Process Biochemistry* 2000; 22(21);940-10.