



IV-1366 - AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA EM ÁREA DE MANEJO DE CARVÃO

Elis Mesquita Horn⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestranda em Engenharia de Produção (PPGEP/UFRGS).

Raíssa Engroff Guimarães⁽²⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS). Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA/UFRGS).

Salatiel Wohlmuth da Silva⁽³⁾

Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Mestre em Engenharia, área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais (PPGE3M/UFRGS). Doctor en Ingeniería y Producción Industrial - Universitat Politècnica de València/España. Professor no Instituto de Pesquisas Hidráulicas no Departamento de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS).

Endereço⁽¹⁾: Av. Osvaldo Aranha, 99 – 5º andar - Bom Fim - Porto Alegre - Rio Grande do Sul - CEP: 900350-190 - Brasil - Tel: +55 (51) 99950-9493 - e-mail: elismesquitahorn@gmail.com

RESUMO

A geração de efluente ácido trata-se de um dos mais complexos problemas ambientais na indústria da mineração, principalmente associado ao carvão mineral. Desde a sua extração até a utilização pelo consumidor final, seja pela disposição inadequada de rejeitos/estéreis ricos em sulfatos, ou pelo manejo e armazenamento não controlado do produto final são inúmeros os problemas ambientais atrelados. Na literatura discute-se os efeitos da drenagem ácida de minas (DAM) ocasionada pelo rejeito de carvão, entretanto, pouco se explora sobre as áreas de manejo e manuseio do mineral, que muitas vezes podem impactar da mesma maneira. A percolação da água da chuva em pilhas de estoque de carvão, situadas em áreas de armazenamento podem gerar drenagens com características semelhantes a drenagem ácida de minas. Paralelamente, existem diversas metodologias de predição da DAM, as quais preveem o comportamento do rejeito e do mineral em contato com as intempéries, visando apoiar a tomada de decisão e estruturação de uma visão estratégica para gestão dos impactos ambientais. O presente trabalho visa investigar a geração de efluente ácido em área de manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul através de método de colunas de lixiviação, metodologia preditiva cinética. Foi realizada a etapa experimental com 8 colunas de lixiviação contendo os diferentes tipos de carvão armazenados na área, e analisados seus resultados analíticos dos parâmetros pH, condutividade e de cromatografia iônica. Os resultados apontaram uma diminuição de pH e o aumento de condutividade para todas as colunas. O maior impacto no lixiviado foi observado para o carvão internacional, devido à menor granulometria e conseqüente maior área superficial para trocas deste material.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem ácida de minas, carvão, lixiviação, impacto ambiental.

INTRODUÇÃO

A contribuição da mineração no modelo de vida atual é indiscutível, contudo, são muitos os impactos ambientais atrelados à atividade. Conforme Machado (2007) a mineração tem potencial de alterações no meio físico, biótico e antrópico, sendo a geração de efluente ácido um dos mais complexos problemas ambientais nessa indústria, principalmente associado ao carvão mineral. Esse efluente ácido, conhecido como Drenagem Ácida de Minas (DAM) é considerado um grande passivo ambiental e está relacionada à exposição de minerais sulfetados às condições atmosféricas, tais quais a água e o oxigênio. Esta exposição resulta na oxidação do enxofre presente na matriz do material minerado, que tem potencial de geração de uma solução ácida e com grandes concentrações de metais (JÚNIOR et al, 2019).

O aumento da acidez e conseqüente redução do pH deve-se a geração de ácido sulfúrico (H₂SO₄) no processo de oxidação, o que pode produzir a solubilização de metais como Cu, Ni, Cd, Zn, Pb, Cr, Fe, Hg e Mn,

implicando em diversos impactos ao meio ambiente (PASTORE e MIOTO, 2000). A geração de drenagem ácida pode ocorrer pela disposição inadequada de rejeitos/estéreis ricos em sulfatos, material descartado antes, durante e/ou após o processo de beneficiamento, ou pelo manejo e armazenamento sem controle ambiental do produto.

Na literatura discute-se os efeitos da drenagem ácida de minas (DAM) ocasionada pelo rejeito de carvão, e majoritariamente, os trabalhos realizados na temática englobam a análise de geração de DAM em áreas de descarte de rejeito e estéril da mineração, não abordando a potencial geração de acidificação em áreas de estoque, manejo e manuseio de carvão, áreas as quais o mineral é disposto diretamente no solo, exposto a intempéries e sujeito a oxidação. Segundo Pimentel (2007), o escoamento das chuvas sobre os estoques de carvão em áreas de armazenamento, podem gerar drenagens com características semelhantes a drenagem ácida de minas.

Nesse contexto, ensaios para a previsão de ocorrência da drenagem ácida consistem em uma ferramenta essencial para a gestão de riscos ambientais na indústria da mineração e, conseqüentemente, para seus consumidores (MACHADO, 2007). Existem duas classificações de métodos preditivos da geração de DAM, os ensaios estáticos e os ensaios cinéticos. Os mesmos têm por finalidade avaliar o potencial de geração da DAM por um determinado material, avaliando a taxa de oxidação de sulfetos e a formação de acidez. Os ensaios estáticos avaliam o potencial de geração de drenagem comparando o potencial de acidificação (AP) com o potencial de neutralização (NP) dos materiais, entretanto não levam em conta aspectos cinéticos. Os ensaios cinéticos buscam incorporar a dinâmica dos elementos naturais da área de estudo, tornando a previsão mais próxima da realidade, reproduzindo as intempéries e ocasionando uma oxidação similar à observada no local. Os ensaios preditivos, se realizados previamente e/ou na fase inicial de exploração e uso do solo para manejo dos minerais, podem apoiar na tomada de decisão e na implantação conjunta de soluções que minimizem o impacto ambiental (MURTA, 2006).

Atentando-se ao exposto acima, são evidentes as contribuições dos ensaios preditivos de geração de DAM, contudo essa análise nem sempre é aplicada. Quando nos referimos a áreas de manejo e manuseio de carvão, esse tipo de ensaio raramente é considerado, visto que pouco se discute sobre seu impacto. Nesse sentido, o presente trabalho visa investigar a geração de efluente ácido em área de manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul por meio de metodologia preditiva cinética.

OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é analisar o potencial de geração de drenagem ácida, através de ensaio preditivo, em área de manejo de carvão situada em um polo industrial no Rio Grande do Sul. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver metodologia adaptada de ensaio preditivo cinético com colunas de lixiviação;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios para os diferentes tipos de carvão mineral e para as variações na técnica de colunas de lixiviação (carvão nacional, importado, *blend* e *blend* afogado);
- Sugerir estratégias de melhoria na gestão da área de manejo de carvão.

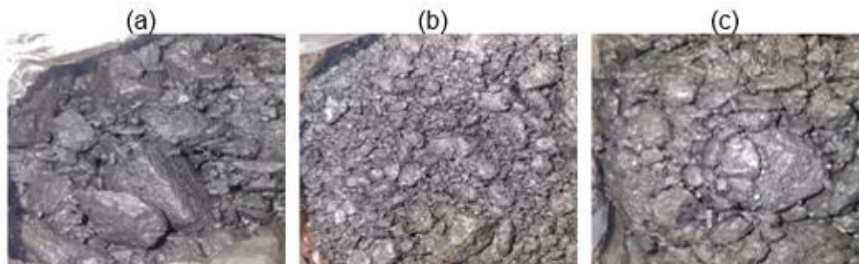
METODOLOGIA

O objeto de estudo foram amostras de carvão mineral de origem nacional, internacional e a mistura delas, o denominado *blend*, coletadas de área utilizada para armazenamento e manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul. O mineral é armazenado em pilhas trapezoidais com granulometria variável, disposto diretamente no solo e majoritariamente sem cobertura de proteção.

Conforme já consolidado na literatura, a composição do carvão internacional apresenta menor geração de emissões poluentes, devido à menor concentração de enxofre, entretanto devido ao elevado custo logístico, o *blend* com carvão nacional, com maior porcentagem de enxofre e considerado de qualidade inferior, visa otimizar a relação custo versus emissões. Dessa forma, o *blend* tem sua composição determinada por fatores comerciais e ambientais, sendo os principais parâmetros: preço, disponibilidade e adequação aos parâmetros legais de emissões atmosféricas vigentes para cada tipo de carvão. Na Figura 1 pode-se observar os diferentes

tipos de materiais disponíveis na área de manejo, na qual pode-se notar a diferença de granulometria entre os mesmos, sendo o carvão nacional o mais robusto e o internacional o mais fino.

Figura 1 - (a) Amostra de Carvão Nacional - CN, (b) Amostra de Carvão Internacional - CI e (c) Amostra de Carvão *Blend* - CB.



Fonte: O autor

Os métodos de predição de drenagem ácida escolhidos foram o de colunas de lixiviação tradicionais e de colunas de lixiviação afogadas descritas por Saria et al (2006) e Murta (2006). Na primeira o material é disposto em colunas e periodicamente é adicionado um determinado volume de água para que a mesma percole, já na segunda o mineral é totalmente saturado com água, simulando a zona saturada no interior das pilhas de carvão, bem como do mineral que é carreado para o sistema de drenagem. A Figura 1 abaixo ilustra esquematicamente o experimento laboratorial, onde cada coluna possui um diâmetro de 3,2 cm e uma altura de 50 cm totalizando um volume de 1286 cm³.

Figura 2 – (a) Esquema das colunas de lixiviação e (b) imagem das colunas de lixiviação.



onde CN 1: Coluna de Lixiviação/Carvão Nacional; CN 2: Coluna de Lixiviação/Carvão Nacional; CI 1: Coluna de Lixiviação/Carvão Importado; CI 2: Coluna de Lixiviação/Carvão Importado; CB 1: Coluna de

Lixiviação/Carvão *Blend*; CB 2: Coluna de Lixiviação/Carvão *Blend*; CAB 1: Coluna Afogada/Carvão *Blend*; CAB 2: Coluna Afogada/Carvão *Blend*.

Amostras de carvão mineral de procedência nacional e internacional e seu *blend*, provenientes do carregamento do dia 20/06/2022, foram coletadas na área de manejo de carvão situada no Rio Grande do Sul - e transportadas para o laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Após, as amostras de carvão foram acondicionadas em cada coluna, conforme Figura 2, e devido a granulometria não uniforme, a quantidade de material foi estabelecida a partir da relação entre a altura da coluna e a altura requerida de carvão, 40 cm. Assim, as mesmas foram expostas à influência de variáveis relacionadas a sua oxidação. As colunas afogadas foram preenchidas com água desmineralizada, ao passo que nas colunas de lixiviação eram adicionados 830 mL de água desmineralizada por semana. Para estimar o volume anual de precipitação e dividi-lo pelo período de 10 semanas (duração total do ensaio), considerou-se a precipitação média anual de 1699 mm (2020 e 2021) e considerou-se a área da coluna de lixiviação em 0,005 m², obtendo-se aproximadamente 830 mL de água desmineralizada semanalmente, um total de 8,30 L no período total do ensaio.

O sistema de colunas foi operado durante o período de dez semanas. Semanalmente a água lixiviada nos recipientes era submetida a análises de pH, condutividade e cromatografia iônica para determinar quais características foram alteradas a partir do contato da água com o material.

As análises dos íons foram realizadas em um cromatógrafo Metrohm Eco IC, enquanto as análises de pH e condutividade foram realizadas com condutímetro DM-32 e pHmetro DM-22 da marca DIGIMED.

RESULTADOS

Os resultados estão apresentados na seguinte ordem: resultados auxiliares e resultados principais. Os resultados auxiliares consistem nos dados básicos de caracterização do carvão e os resultados principais são os dados das análises físico-químicas.

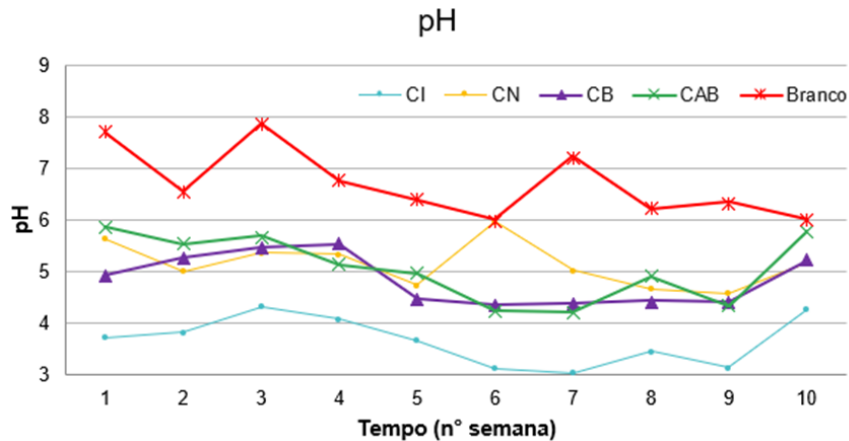
A caracterização básica do carvão mineral foi realizada pelo fornecedor e engloba dados de poder calorífico superior e inferior, a umidade total, a análise elementar de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, halogênios, a análise imediata de cinzas, material volátil, enxofre total, a análise química das cinzas e a granulometria. A grande diferença entre os tipos de carvão, nacional (CN) e internacional (CI), além do poder calorífico, é o teor de enxofre, a maior porcentagem de enxofre encontrado para o CN foi de 0,79%, já para o CI, 0,67%.

Em relação aos resultados das análises físico-químicas destaca-se aqui os três principais parâmetros, pH, condutividade e sulfatos. Esses parâmetros são os elementos chaves para prever o comportamento do lixiviado, sendo uma diminuição do pH, aumento da condutividade e conseqüente aumento dos cátions e ânions presentes em solução, indícios de geração de efluente ácido no contato com o carvão mineral.

Para o pH (Figura 3), os resultados apresentaram uma diminuição nos valores para todos os lixiviados, apontando uma diminuição do potencial hidrogeniônico pela percolação da água através do carvão. As colunas que apresentaram maior impacto no pH foram as que continham o CI, o contrário do esperado. O carvão internacional mesmo possuindo uma qualidade superior aos demais tipos de carvão mineral, com menor teor de enxofre, devido a sua granulometria com partículas menores, possui uma maior área superficial para contato. Com uma área superficial maior, as trocas de íons com a água são facilitadas, tornando a estocagem de carvão internacional

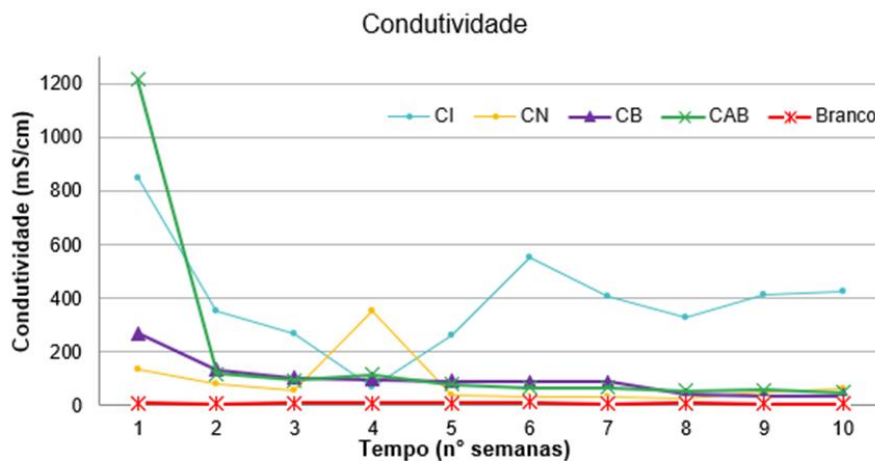
a mais prejudicial em termos de pH. O carvão nacional apresentou o menor impacto em relação ao parâmetro, seguido pelo carvão *blend* nas colunas afogadas e por fim o carvão *blend* convencional.

Figura 3 - Valores do potencial hidrogeniônico registrados para as colunas ao longo de 10 semanas de ensaio.



A condutividade, Figura 4, assim como o pH, apresentou um impacto considerável, com todos os efluentes das colunas proporcionando aumentos no parâmetro. Os valores mais altos estão vinculados ao carvão internacional, com exceção da lixiviação das semanas 1 e 4, que apresentaram os efluentes das colunas CAB e CN com valores mais altos, sendo um *outlier* do comportamento geral do experimento. Além do CI, tivemos o segundo maior impacto atrelados ao CAB, e posteriormente ao CB e CN.

Figura 4 - Valores da condutividade registrados para as colunas ao longo de 10 semanas de ensaio.

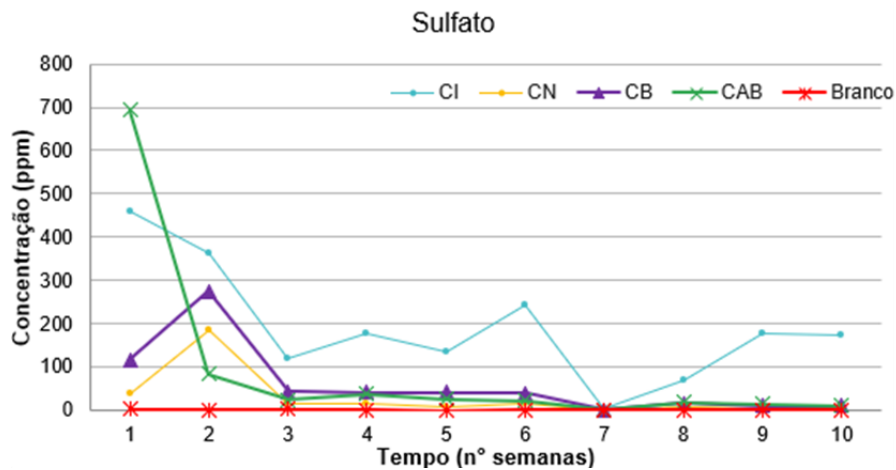


Os resultados obtidos para o parâmetro condutividade evidenciam a dissolução de íons no lixiviado, agregando diferentes cátions e ânions. Para mapear os íons presentes no efluente, foi realizada a análise de ânions e cátions. Foram analisados os seguintes ânions: fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, fosfato e sulfato, e cátions: lítio, sódio, amônio, potássio, magnésio e cálcio.

O principal íon de interesse é o ânion sulfato (SO_4^{2-}), devido a sua relação com a geração de H_2SO_4 , subproduto da oxidação da pirita. Observa-se na Figura 5, um aumento para todos os lixiviados, indicando que a diminuição do pH está relacionada com a geração de H_2SO_4 , na oxidação dos minerais sulfetados presentes no carvão. Com exceção da semana 1, no qual o CAB despontou como maior resultado, o CI apresentou os valores mais elevados para o parâmetro, mostrando-se novamente o mineral com maior potencial de impacto no ambiente. Entre todas as amostras de carvão consideradas, o CI se destaca pela menor taxa de enxofre em sua composição, dessa forma,

o resultado para as análises de sulfatos deveria ser superior nos demais tipos do mineral. Entretanto, a granulometria do CI conta com partículas menores e possui uma área superficial para contato maior, sendo essa a possível causa do cenário encontrado.

Figura 5 - Valores de sulfato registrados para as colunas ao longo de 10 semanas de ensaio.



DISCUSSÃO

O carvão mineral armazenado em áreas de manejo de carvão, quando vulnerável à ação das intempéries, pode gerar uma drenagem ácida similar a drenagem ácida de minas, com baixo pH e altos teores de sulfatos. Em relação à área de manuseio de carvão em questão, pode-se inferir que sua drenagem pluvial tem potencial de gerar impactos no ambiente.

Muitos são os fatores que influenciam no processo de lixiviação em área de manuseio, entre eles a qualidade do mineral a ser lixiviado, o volume de água pluvial que percola nas pilhas de armazenamento, o tipo de solo em contato com o mineral, o sistema de drenagem pluvial do local e a granulometria do material.

No caso deste estudo, o CI, mineral com caracterização de melhor qualidade em parâmetros operacionais, com maior eficiência energética e menor concentração de sulfatos, foi o que apontou mais impactos nos parâmetros analisados para o lixiviado. O CI apresentou desvios de qualidade em relação ao afluente para os parâmetros pH, condutividade, fluoreto, nitrato, sulfato, magnésio, potássio e amônio. Estes resultados podem ser relacionados à granulometria do carvão. O CI é composto por partículas finas em comparação aos demais tipos de carvão, compostos de sólidos grosseiros, possuindo uma maior área superficial para contato. Com essa maior área superficial, a influência da água na lixiviação se torna mais efetiva, facilitando a troca iônica e a oxidação do mineral sulfetado, tornando a estocagem de carvão internacional a mais prejudicial em termos ambientais, neste caso.

Os demais tipos de carvão mineral, nacional e *blend*, também apresentaram desvios nos parâmetros analíticos avaliados, se comparados com os valores iniciais da água inserida nas colunas. No caso do carvão *blend*, os resultados demonstraram impacto referente ao lixiviado tanto das colunas tradicionais, como das colunas afogadas. Os elementos cujo impacto foi relevante para a deterioração da qualidade do efluente foram pH, condutividade, sulfatos.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvida e aplicada metodologia adaptada de ensaio preditivo cinético com colunas de lixiviação tradicionais e afogadas em três tipos de carvão mineral, sendo as colunas montadas e operadas por 10 semanas consecutivas e obtendo-se resultados coerentes. Foram analisados os dados secundários de

caracterização do carvão, e, por fim, foram comparados os resultados obtidos nos ensaios para os diferentes tipos de carvão mineral em todas as variações propostas, coluna tradicional e coluna afogada.

Os resultados apontaram que, ao contrário do que se esperava, o carvão internacional é o com maior potencial poluidor entre os demais, devido a granulometria em que é armazenado, possuindo uma área superficial para contato maior, sendo mais propenso à lixiviação.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a realização do ensaio com a utilização de outros métodos de lixiviação para comparação dos resultados obtidos. Outra possibilidade a ser explorada é a análise granulométrica do carvão e como isso impacta na geração de drenagem ácida, correlacionando as variáveis. Em relação às análises de caracterização de efluente, sugere-se a realização de análises de metais, visto que o aumento da acidez e conseqüente redução do pH deve-se a geração de ácido sulfúrico (H_2SO_4) no processo de oxidação, o que pode produzir a solubilização de metais. Essa avaliação poderia robustecer a análise dos impactos ao meio ambiente.

A partir do diagnóstico do problema, sugerem-se, de forma geral, estratégias e melhorias com potencial de otimizar e implementar uma gestão focada na qualidade ambiental em áreas de manejo do carvão. As estratégias e melhorias encontram-se elencadas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Sugestão de melhorias para áreas de manejo

Tipo	Melhoria	Ação
Logística	Utilização de área coberta para o manejo do carvão internacional, evitando sua lixiviação pela ação da chuva, devido ao seu maior impacto no ambiente.	Preventiva
Material	Viabilização com fornecedor de envio do mineral com granulometria mais robusta para diminuir o impacto da lixiviação.	Preventiva
Estrutural	Ampliação de área coberta do empreendimento para dificultar a lixiviação pela ação da chuva.	Preventiva
Estrutural	Impermeabilização do solo e Implementação de tratamento e destinação da drenagem pluvial.	Corretiva
Manutenção	Realizar manutenção em todo o sistema de drenagem, a fim de garantir sua eficácia.	Preventiva

Fonte: O autor

Seguindo as estratégias de melhoria com potencial de aprimorar a gestão ambiental em áreas de manejo, entende-se que o primeiro passo é identificar se há o potencial de geração de drenagem ácida através dos métodos preditivos conhecidos e aceitos, para que a tomada de decisão na implantação de soluções que minimizem o

impacto ambiental seja assertiva. Com essa determinação, deve-se seguir para implementação de boas práticas de gestão ambiental, conforme Tabela 1, minimizando os potenciais impactos deste tipo de empreendimento.

REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 357 de 17 de março de 2005.
2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução n° 430 de 13 de maio de 2011.
3. CAMPOS, M. L. et al. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. Revista de Ciências Agroveterinárias, [s. l.], 2010.
4. COSMO, B. M. N. et al. Carvão Mineral. Revista Agronomia Brasileira, São Paulo, 2020.
5. Farfán J.R.J.Z, O. Barbosa Filho; V.P. de Souza. 2004. Avaliação do Potencial de Drenagem Ácida de rejeitos da indústria mineral. CETEM/MCT (Centro de Tecnologia Mineral) Série Tecnologia Mineral n° 29.
6. GIL, A. C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 5a ed. São Paulo: Atlas, 1999.
7. GUEVARA, L. R. Z. Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.
8. JÚNIOR, O.M.M., JÚNIOR, L.U.B., DUARTE, M.H.R., MEIER, S.F.A. (2019). Predição da Drenagem Ácida de Minas por Ensaio Estáticos e Cinéticos. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte - MG.
9. MACHADO, L. A. Ensaio Estáticos e Cinéticos para a Prevenção da Geração de Drenagem Ácida de Minas na Mineração de Carvão com Cinzas de Termoelétrica e Escória de Aciaria. 2007. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2007.
10. Pastore, E.L., Mito, J.A. Impactos Ambientais em Mineração com Ênfase à Drenagem Ácida e Transporte de Contaminantes”, in: Solos e Rochas, v.23, no1, pp. 33-53, 2000.
11. PIMENTEL, D. A.; LUZ, J. A. M. Pluvial percolation in pyrite-bearing coal stockpiles. Revista Escola de Minas, [s. l.], 2009.
12. PIMENTEL, D. A. Tratamento de Efluente de Percolação Pluvial em Pilhas de Carvão Mineral. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2007.
13. Portaria MME n° 540/2021. Ministério de Minas e Energia. Detalhamento do Programa para Uso Sustentável do Carvão Mineral Nacional. 2021.
14. SARIA, L.; SHIMAOKA, T.; MIYAWAKI, K. Leaching of heavy metals in acid mine drainage. Waste Management & Research, [s. l.], 2006.
15. SOUZA, V. P. Drenagem ácida, aspectos ambientais: uma revisão. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 48p.