

Avaliação do Potencial Adsorvente de Rejeitos de Mineração Frente a Íons Manganês em Diferentes Valores de pH

Assessment of the Adsorbent Potential of Mining Waste Against Manganese Ions at Different pH Values

Marcos V. A. Mendes & Vanessa N. Alves

A utilização de resíduos de mineração como adsorventes vem sendo muito abordada na literatura. Esses materiais normalmente são descartados em pilhas ou barragens, e se reutilizados para outras finalidades, podem significar redução de passivos ambientais para o setor de mineração. Neste sentido, este estudo objetiva caracterizar e avaliar a capacidade de adsorção frente a íons manganês em diferentes faixas de pH de resíduos de mineração tais como rejeito magnético, rejeito de flotação e lama. Os melhores resultados de adsorção foram obtidos em pH alcalino, sendo que a lama apresenta melhor potencial adsorvente em relação aos demais materiais, possivelmente devido a suas propriedades físicas e químicas.

Palavras-chave: *adsorção; resíduos de mineração; manganês.*

The use of mining waste as adsorbents has been much discussed in the literature. These materials are usually disposed of in heaps or dams and, if reused for other purposes, could mean a reduction in environmental liabilities for the mining sector. In this sense, this study aims to characterize and evaluate the adsorption capacity against manganese ions in different pH ranges of mining waste such as magnetic tailings, flotation tailings and sludge. The best adsorption results were obtained at alkaline pH, with slurry showing better adsorption potential than the other materials, possibly due to its physical and chemical properties.

Keywords: *adsorption; mining residues; manganese.*

Introdução

A mineração é um setor da indústria que movimentando grandes quantidades de material durante suas atividades de extração de bens minerais. Ao final das etapas de lavra e processamento mineral, somente parte do material extraído é recuperado e torna-se o produto que é então comercializado, implicando, conseqüentemente, na geração de grandes quantidades de resíduos, os quais são descartados geralmente em pilhas ou barragens.

Mesmo que estes resíduos sejam descartados e armazenados de forma correta do ponto de vista ambiental, a quantidade gerada é grande, e quaisquer alternativas que visem sua minimização, são interessantes e podem significar redução de custos de processo e passivos ambientais. Neste sentido, estudos para viabilizar o reaproveitamento de resíduos de mineração para as mais variadas finalidades são realizados constantemente, desde uso na produção de massa asfáltica,¹ concreto,² tijolos solo-cimento,³ tintas,⁴ geopolímeros,⁵ além de insumos para a agricultura.⁶

Dentre as diversas possibilidades, a reutilização destes resíduos como adsorventes,⁷⁻¹³ objeto de estudo deste trabalho, também apresenta potencial, visto que estes materiais podem ser aplicados posteriormente em diferentes finalidades como, por exemplo, remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos no tratamento de água, os quais geralmente se apresentam em quantidades traço, dificultando a remoção por meio de técnicas convencionais.^{14,15}

A adsorção é basicamente uma técnica de concentração de massas onde uma fase sólida (adsorvente) concentra e acumula em sua superfície, substâncias (adsorvato) que estão presentes em fluidos líquidos ou gasosos.^{15,16} As forças de interação na superfície do adsorvente são capazes de atrair as moléculas de poluentes presentes no fluido e realizar a extração.¹⁷

Para avaliar o potencial de um material como adsorvente é importante entender suas características físicas e químicas, estudar o pH ideal que maximiza a adsorção, a cinética e termodinâmica de adsorção, além de avaliar o comportamento mediante técnicas de extração em coluna de leito fixo.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo realizar a caracterização física e química de resíduos de mineração (rejeito magnético, rejeito de flotação e lama) e avaliar seu potencial adsorvente frente a íons manganês dispersos em solução em diferentes faixas de pH.

Justifica-se esta análise no sentido que o reaproveitamento de resíduos de mineração que são descartados em pilhas ou barragens pode significar a diminuição da quantidade de material descartado e, conseqüentemente, redução do passivo e impactos ambientais provenientes das atividades de extração mineral. Além disso, o reaproveitamento dos resíduos também poderá contribuir para a obtenção de alternativas de remoção do poluente manganês em processos industriais.

Metodologia

Inicialmente foi realizada a coleta dos resíduos de mineração em uma usina de processamento mineral. O rejeito magnético foi coletado na etapa de separação magnética, a lama foi proveniente de etapas de deslamagem em hidrociclones, e o rejeito de flotação coletado no afundado das etapas de flotação em célula mecânica.

Ambos os materiais estavam em forma de polpa, que é basicamente água mais sólidos. Portanto, uma etapa de secagem em estufa a 100 ± 5 °C foi realizada por aproximadamente 24 horas após a coleta, possibilitando obter um material seco e apto a realização das etapas subsequentes deste estudo.

Os três materiais foram caracterizados com o auxílio de técnicas tais como a Espectroscopia de Fluorescência por Energia Dispersiva de Raios X (EDX) e Microscopia Eletrônica de varredura (MEV), além de ensaios de lixiviação, análise granulométrica, determinação da área superficial específica, porosidade e ponto de carga zero (pH_{pCZ}).

Na caracterização química por EDX uma pequena quantidade de amostra dos materiais adsorventes foi selecionada e inserida na forma de pastilha no equipamento modelo Shimadzu 7000, com energia variando entre 0 e 45 keV, utilizando canal de leitura

de alumínio-urânio, o que permitiu obter os elementos químicos presentes, proporcionados em função do elemento mais predominante na amostra.

O MEV foi realizado com o auxílio de um microscópio da marca Tescan, modelo VEGA 3 LMU, equipado com detector por microanálise EDS, marca Oxford, modelo INCA X-ACT. Para realização dos ensaios, as amostras foram previamente metalizadas utilizando uma metalizadora para carbono e ouro da marca Quorum, modelo QR 150ES.

Os ensaios de lixiviação foram realizados em um béquer contendo 10 mL de ácido nítrico em concentração de 2 mol L⁻¹, onde adicionou-se 30 mg do material avaliado. Esta solução foi agitada por 10 minutos em mesa agitadora da marca Nova Ética com rotação de 150 rpm e posteriormente filtrada, destinando-se o sobrenadante para análise por EDX, para verificação da composição inorgânica do lixiviado.

Os ensaios para determinação da granulometria dos materiais adsorventes foram realizados utilizando a série de peneiras com malhas de 8, 16, 30, 50, 100, 150 e 200 mesh, sequenciadas da abertura maior para a menor, de cima para baixo, e utilizando procedimento adaptado da norma NM 248.¹⁸ Foi pesado em uma balança de precisão 300 g do material e adicionado ao conjunto de peneiras, o qual foi colocado em agitação durante 15 minutos com rotação de 200 rpm em um agitador de peneiras de bancada. Após o período de agitação, a massa de material retida em cada peneira foi removida com o auxílio de um pincel e pesada na balança de precisão. Os ensaios foram realizados em duplicata.

Para a determinação da área superficial específica e porosidade, as amostras dos materiais adsorventes foram submetidas a um pré-tratamento a 70°C por 24h para eliminação de voláteis. Posteriormente, as propriedades morfológicas foram determinadas por isotermas de adsorção de nitrogênio a -195,5°C utilizando o instrumento de fisissorção modelo ASAP2020 Plus, marca Micromeritics, na faixa de pressões relativas (P/P₀) de 0 a 0,995. A área superficial específica (S_{BET}) foi determinada pelo método BET (Brunauer-Emmett-Teller);¹⁹ o diâmetro médio de poros (dp) foi calculado pelo método BJH

(Barrett-Joyner-Halenda),²⁰ onde V_p é o volume total de poros, o qual foi calculado pela conversão da quantidade de gás N₂ adsorvido a P/P₀ de 0,995 para o volume do adsorbato líquido.

O ensaio para determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) dos materiais foi realizado seguindo o proposto por estudos previamente publicados na literatura.²¹⁻²⁴ Em um frasco erlenmeyer de 125 mL foram adicionados 20 mL de água deionizada e 100 mg do material adsorvente. O pH desta solução foi aferido e ajustado com ácido clorídrico e hidróxido de sódio diluídos visando atingir valores pré-definidos de pH entre 1 e 12. Após 24 horas com a solução em repouso, o pH foi novamente aferido, o que permitiu obter a variação entre o pH inicial e final, onde o pH_{PCZ} é o ponto em que essa variação foi nula. Todo o ensaio foi realizado em duplicata.

Após todos os ensaios de caracterização dos parâmetros físicos e químicos dos materiais adsorventes, o procedimento subsequente foi avaliar o potencial de adsorção em diferentes faixas de pH.

O ensaio consistiu em colocar sob agitação por 10 minutos a 200 rpm, 30 mg do material adsorvente (rejeito magnético, lama e rejeito de flotação) juntamente com 10 mL de uma solução contendo os íons manganês na concentração de 2 mg L⁻¹. A adsorção foi avaliada na faixa de pH de 2 a 10, com todos os ensaios realizados em triplicata.

Após o período de agitação, a solução foi filtrada em papel filtro e o sobrenadante destinado a análise por espectrometria de absorção atômica por chama (FAAS), realizada no espectrômetro marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 400, com auxílio de uma lâmpada multielementos (Co – Cu – Fe – Mn – Mo) da marca Perkin Elmer, modelo Lumina Lamp, no comprimento de onda 279,48 nm.

Resultados e Discussão

Conhecer a composição química de um material é fundamental para avaliar seu comportamento quando submetido a experimentos laboratoriais diversos. A Tabela 1 apresenta os resultados da análise de composição inorgânica dos adsorventes estudados.

Tabela 1. Resultados de análise química realizada por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) dos materiais rejeito magnético (RM), rejeito de flotação (RF) e lama (L).

Elemento	RM (%)	RF (%)	L (%)
Fe	79.33	50.34	48.28
Ca	3.61	1.88	16.05
Si	6.55	35.83	13.36
Ba	-	-	5.33
P	3.94	2.02	5.23
Mn	0.85	0.94	3.42
Ce	-	-	2.97
Nb	0.36	0.86	1.39
Sr	0.18	0.40	1.08
Ti	4.32	6.32	0.85
Zr	0.18	0.51	0.71
S	-	-	0.55
Cu	0.08	0.15	0.30
K	-	0.19	0.16
Zn	0.08	8.90	0.15
Ni	-	3.90	0.14
Y	-	1.60	4.80
Th	-	0.11	-
V	0.28	0.30	-
Cr	0.26	-	-

De forma geral, os elementos predominantes em todos os materiais são basicamente ferro (Fe), cálcio (Ca) e silício (Si), fato este que provavelmente está relacionado a gênese do depósito que permitiu a extração do bem mineral de interesse e gerou os resíduos avaliados neste estudo.

A alta proporção de Fe no rejeito magnético se relaciona a sua remoção por meio da etapa de separação magnética durante o processamento mineral, que concentra minerais com alta susceptibilidade magnética,²⁵ os quais apresentam quantidades consideráveis de Fe em sua composição química.²⁶

A análise por EDX também permitiu verificar que há a presença de manganês (Mn) nos três materiais, o que torna importante considerar que ensaios de adsorção em faixas de pH diferentes podem dispor esse elemento químico em solução e mascarar os resultados. Portanto, o ensaio de lixiviação torna-se importante para este estudo e seus resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das análises de espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDX) das soluções lixiviadas provenientes do contato de ácido nítrico (2 mol L⁻¹) com os materiais rejeito magnético (RM), rejeito de flotação (RF) e lama (L).

Elemento	RM (%)	RF (%)	L (%)
Fe	36.34	33.81	38.28
Hf	30.67	-	-
Cu	21.38	47.00	3.78
Ca	11.61	19.19	6.55
Si	-	-	45.44
Ti	-	-	3.25
Mn	-	-	1.47
Sr	-	-	1.24

É possível observar que em contato com meio ácido diversos elementos químicos são extraídos dos materiais adsorventes. Entretanto, somente a lama libera íons manganês (Mn), que é o íon metálico utilizado como adsorvato neste estudo. Logo, em estudos para avaliação do potencial adsorvente, realizados em meio ácido, será importante o acompanhamento da possível liberação deste íon, o que poderá eventualmente impactar nos resultados.

Em complemento a análise química dos materiais, as imagens de MEV permitem avaliar a forma e estrutura apresentada pelas partículas dos materiais (Figuras 1, 2 e 3), parâmetros que impactam nos mecanismos de adsorção.

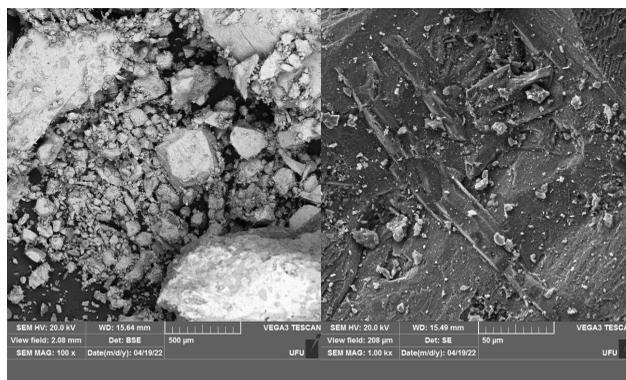


Figura 1. Imagem do rejeito magnético obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV) com ampliação de 100 vezes à esquerda e 1000 vezes à direita.

Em todos os materiais não é possível identificar uma forma ou estrutura predominante, além das partículas se apresentarem em tamanhos variados. Tal fato provavelmente deve-se a fragmentação por britagem e moagem, as quais o material é submetido antes de chegar nas etapas de separação magnética, deslamagem e flotação, onde foram coletados.

É possível notar que o rejeito magnético apresenta partículas grosseiras e finas misturadas (Figura 1), enquanto o rejeito de flotação já possui partículas com uma granulometria mais uniforme (Figura 2), e a lama apresenta-se com partículas finas e aspecto de que foram aglomeradas (Figura 3). Esse fato se deve provavelmente aos processos de aglomeração que ocorreram durante as etapas de secagem em estufa para preparação das amostras em laboratório. Um processo que ocorre tipicamente com partículas extremamente finas quando submetidas a secagem.

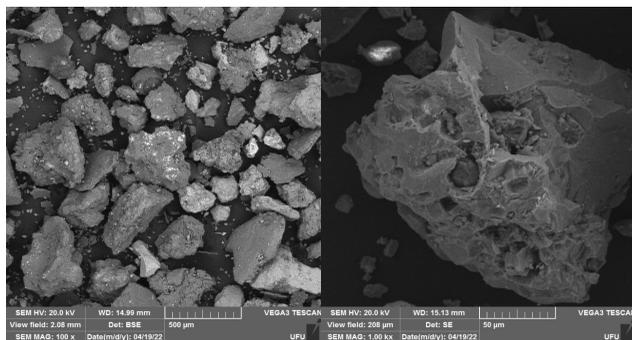


Figura 2. Imagem do rejeito de flotação obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV) com ampliação de 100 vezes à esquerda e 1000 vezes à direita.

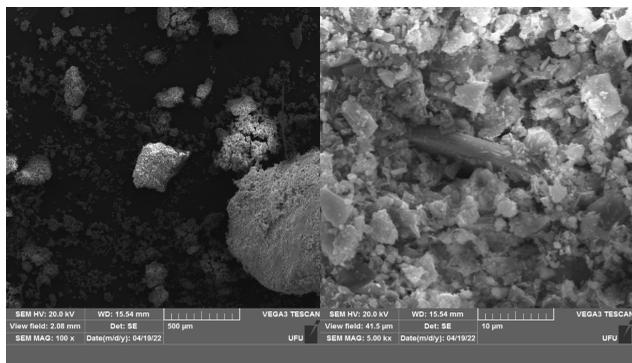


Figura 3. Imagem da lama obtida por microscópio eletrônico de varredura (MEV) com ampliação de 100 vezes à esquerda e 5000 vezes à direita.

A granulometria apresentada pela lama está relacionada com o processo no qual o material foi obtido: a deslamagem. O intuito dos hidrociclones presentes nesta etapa é a remoção de partículas finas do processo que prejudicam a concentração por meio da flotação. Deste modo, era de se esperar que este material realmente apresentasse granulometria extremamente fina, comprovada pelos resultados dos ensaios de granulometria apresentados no gráfico da Figura 4.

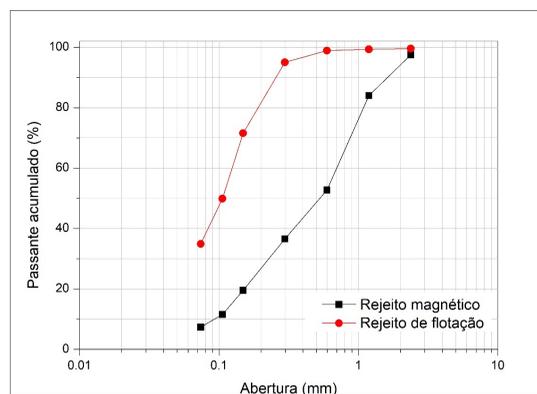


Figura 4. Resultados dos ensaios de distribuição granulométrica para o rejeito magnético e rejeito de flotação.

O rejeito magnético e o rejeito de flotação apresentam diferentes faixas granulométricas de distribuição das partículas, sendo o rejeito magnético um material mais “grosso”. A Figura 4 não apresenta a curva de distribuição granulométrica da lama, visto que todas as partículas deste material são menores que 400 mesh, menor abertura das peneiras utilizadas nos ensaios. Logo, este é um indicativo de que as partículas de lama são extremamente finas e sua área superficial pode se apresentar maior que a dos demais materiais, influenciando diretamente nos mecanismos de adsorção.¹⁵

A porosidade do material é outro parâmetro que tem influência direta na capacidade de adsorção, assim como a área superficial específica.¹⁵ A Tabela 3 apresenta os resultados de análise morfológica dos materiais, mais especificamente da área superficial específica (S_{BET}) por grama de material, o volume de poros (V_p) por grama de material e o diâmetro do poro (d_p).

Tabela 3. Resultados dos experimentos de análise morfológica dos materiais.

Material	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	V_p ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	d_p (nm)
Rejeito Magnético	0,87	0,00462	21,19
Rejeito de flotação	2,14	0,00978	18,3
Lama	30,94	0,09330	12,06

A lama é o material que apresenta o maior volume de poros por grama de material, devido ao fato de seus poros serem menores, permitindo que uma maior quantidade esteja presente na mesma área de material que a apresentada pelo rejeito magnético ou rejeito de flotação. Conseqüentemente, a lama também é o material que apresenta maior área superficial específica por grama de material. Isto implica em uma quantidade de poros por área maior que os demais materiais, culminando em maior área disponível para interação entre a superfície da partícula adsorvente e o adsorvato presente na fase fluida, o que impactará certamente em seu desempenho adsorvivo.

O ponto de carga zero (pH_{PCZ}) é outra característica importante dos adsorventes, pois permite entender o comportamento superficial elétrico do material, ajudando a estabelecer os parâmetros mecânicos pelos quais a adsorção ocorre.²¹ Basicamente, o pH do meio altera as cargas superficiais apresentadas pelo adsorvente, o que impacta diretamente os mecanismos de adsorção.¹⁵

O pH_{PCZ} é o pH em que as cargas elétricas de superfície dos materiais apresentam-se neutras ou nulas.^{23,27} Valores de pH superiores ao pH_{PCZ} significam que a superfície do material possui cargas predominantemente negativas, proporcionando a atração de cátions, enquanto valores inferiores culminam em uma superfície carregada predominantemente de maneira positiva, atraindo ânions.²⁸

Toda essa dinâmica de cargas elétricas na superfície dos materiais adsorventes tem impacto direto na adsorção, e a Figura 5 apresenta os resultados de pH_{PCZ} para os três materiais avaliados.

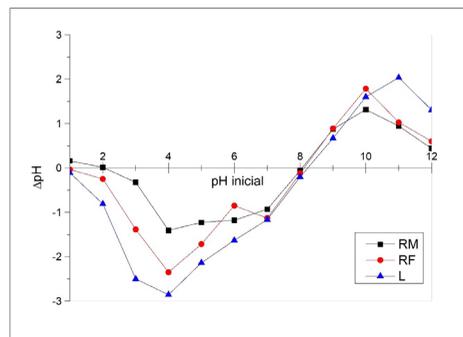


Figura 5. Resultados dos experimentos para determinação do ponto de carga zero (pH_{PCZ}) do rejeito magnético (RM), rejeito de flotação (RF) e lama (L).

O pH_{PCZ} para o rejeito magnético e rejeito de flotação está em torno de 8,1, enquanto para lama é 8,2. Como o íon metálico avaliado neste estudo como adsorvato é o manganês, em solução aquosa, ele apresenta-se como cátions Mn^{2+} . Assim espera-se que situações em que a superfície do adsorvente se encontra com cargas negativas seriam interessantes para maximizar a atração e, conseqüentemente, a adsorção. Portanto, sugere-se que o pH ideal para realizar a adsorção seja maior que o pH_{PCZ} dos materiais.

Neste sentido, foi realizada a investigação do pH ideal através de ensaios de adsorção executados em faixas de pH variando entre 2 e 10, sendo os resultados apresentados na Figura 6.

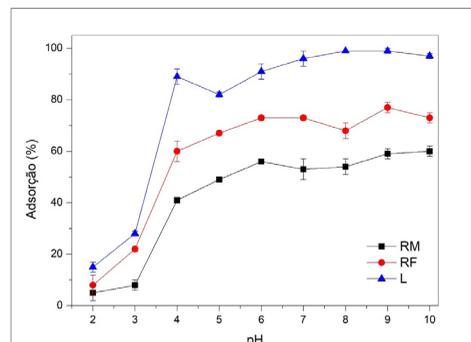


Figura 6. Percentual de adsorção de íons manganês (Mn) pelos materiais rejeito magnético (RM), rejeito de flotação (RF) e lama (L), com variação do pH de 2 até 10.

Sugere-se, ao avaliar o gráfico, que os melhores resultados de adsorção são obtidos em pH alcalino para todos os materiais e, mais especificamente, o pH 9 apresenta a máxima capacidade de adsorção de cada material, corroborando com as discussões acerca do pH_{PCZ} .

A lama é o material que apresenta a maior capacidade de adsorção em todas as faixas de pH avaliadas, seguida pelo rejeito de flotação e o rejeito magnético. É pertinente sugerir, que a granulometria extremamente fina da lama, o maior volume de poros e de área superficial específica por grama de material culminem em partículas com maior área disponível para realizar a atração e extração dos íons dispersos em solução.

Além disso, como menores percentuais de adsorção são obtidos em pH ácido para todos os materiais estudados, a preocupação com a liberação de íons manganês (Mn) em solução, fruto dos ensaios de lixiviação, pode ser desconsiderada, visto que estudos de adsorção posteriores (isotermas, cinética) e extração serão realizados em pH alcalino, onde a adsorção é maximizada para ambos os materiais.

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo permitem sugerir que os resíduos de mineração, tais como rejeito magnético, rejeito de flotação e lama, possuem potencial para atuar como adsorvente para íons metálicos, com destaque para o último, que se sobressaiu nos ensaios de adsorção. Tal fato deve-se as suas características físicas, como granulometria extremamente fina e grande volume de poros e área superficial específica.

Para ambos os materiais, os melhores resultados de adsorção foram obtidos em pH alcalino, em valores acima do pH_{PCZ} . Além disso, a lixiviação de íons manganês da estrutura da lama não é algo preocupante, pois ensaios posteriores para definição de isotermas de adsorção, cinética de adsorção e extração serão realizados em pH alcalino, no qual obteve-se o melhor desempenho.

Agradecimentos

Nossos agradecimentos especiais ao Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia (IQ-UFU) e ao Instituto de Química da Universidade Federal de

Catalão (IQ-UFCAT), pela contribuição significativa para a realização dos experimentos deste estudo.

Referências

1. SILVA, A. L. A.; Batista, L. S.; ANDRADE, S. S. F.; Leal, J. P. C.; COSTA, D. B.; Estudo da reutilização do rejeito de scheelita em substituição do agregado miúdo na composição de misturas asfálticas; 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade; Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais: Foz do Iguaçu, **2019**, p. 1-8. <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/1-065.pdf>
2. BENARCHID, Y.; Taha, Y.; ARGANE, R.; TAGNIT-HAMOU, A.; BENZAAZOUA, M.; J. Cleaner Prod. **2019**, 221, 419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.227>
3. VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F. O.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. S. B.; MENDES, R. F.; Constr. Build. Mater. **2020**, 262, 120883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>
4. GALVÃO, J. L. B.; ANDRADE, H. D.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C.; J. Cleaner Prod. **2018**, 200, 412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.313>
5. CAPASSO, I.; LIRER, S.; FLORA, A.; FERONE, C.; CIOFFI, R.; CAPUTO, D.; LIGUORI, B.; J. Cleaner Prod. **2019**, 220, 65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.164>
6. WELTER, M. K.; BATISTA, P. F.; LEITE, N. B.; SCHAEFFER, M. O.; Reaproveitamento de resíduos de mineração na agricultura; VI Fórum de integração – empreendedorismo e desenvolvimento regional sustentável; Instituto Federal de Roraima, **2017**. https://periodicos.ifrr.edu.br/index.php/anais_forint/article/view/439/272
7. ALMEIDA, C. A.; Avaliação do comportamento sortivo de rejeito de mineração em relação a compostos modelo; Tese – Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, **2019**. <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/27601/1/texto%20completo.pdf>
8. ALMEIDA, C. A.; OLIVEIRA, A. F.; PACHECO, A. A.; LOPES, R. P.; NEVES, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; Chemosphere **2018**, 209, 411. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.071>
9. GEREMIAS, R.; Utilização de rejeito de mineração de carvão como adsorvente para redução da acidez e remoção de íons de metais em drenagem ácida de mina de carvão; Tese - Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, **2008**.
10. GEREMIAS, R.; LAUS, R.; FÁVERE, V. T.; PEDROSA, R. C.; Revista Brasileira de Ciências Ambientais **2012**, 25. https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBciAMB/article/view/316/265?
11. GEREMIAS, R.; LAUS, R.; FÁVERE, V. T.; PEDROSA, R. C.; Quím. Nova **2010**, 33, 1677. <https://www.scielo.br/j/qn/a/BTLNShW4wD5c4LQY6b4v5Bd/?format=pdf&lang=pt>
12. MORAIS, M. B.; Modificações do rejeito da samarco rico em ferro para uso como adsorventes; Dissertação - Universidade Federal de Viçosa: Florestal, **2018**.
13. ZENG, L.; Li, X.; Liu, J.; Water Research **2004**, 38, 1318. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.009>

14. MOREIRA, S. A.; Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo; Dissertação - Universidade Federal do Ceará: Fortaleza, **2008**.
15. NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; Melo, D. Q.; RAULINO, G. S. C.; Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais, Imprensa Universitária: Fortaleza, **2014**.
16. RUTHVEN, D. M.; Principles of Adsorption and Adsorption Process, John Wiley & Sons: Canadá, **1984**.
17. DANTAS, T. L. P.; Separação de dióxido de carbono por adsorção a partir de misturas sintéticas do tipo gás de exaustão; Tese - Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, **2009**.
18. Norma Mercosul. NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Mercosul de Normalização, **2001**.
19. BRUNAUER, S; Emmett, P. H.; TELLER, E.; J. Am. Chem. Soc. **1938**, 60, 309. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
20. BARRETT, E. P.; JOYNER, L. G.; HALENDA, P. P.; J. Am. Chem. Soc. **1951**, 73, 373. <https://doi.org/10.1021/ja01145a126>.
21. MUNIZ, J. S.; SIQUEIRA, A. G.; OLIVEIRA, J. A. N.; FERREIRA, M. M.; ALVES, V. N.; Rev. Virtual Quim. **2020**, 12, 1389. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200111>.
22. SANTANA, S. A. A.; VIEIRA, A. P.; SILVA FILHO, E. C.; MELO, J. C. P.; AIROLDI, C.; J. Hazard. Mater. **2010**, 174, 714. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.109>.
23. SILVA, C. A. de S.; Desenvolvimento de uma metodologia para determinação de Pb²⁺ em matrizes aquosas utilizando nanopartículas magnéticas; Dissertação – Universidade Federal de Goiás: Catalão, **2018**.
24. WANG, L.; ZHANG, J.; WANG, A.; COLLOIDS Surf., A **2008**, 322, 47. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.02.019>.
25. MENDES, M. V. A.; SILVA, G. S. R.; GOMES, L. C.; SIQUEIRA, L. A.; Silva, G. G.; PEREIRA, P. E. C.; Holos **2021**, 4, 1. <https://doi.org/10.15628/holos.2021.8627>.
26. SOUZA, T. A.; Suscetibilidade magnética como medida de detecção de hematita no Abrigo de Itapeva, SP; Cadernos do Lepaarq **2021**, 198. <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/lepaarq/article/view/20190>.
27. DEOLIN, M. H. S.; FAGNANI, H. M. C.; ARROYO, P. A.; BARROS, M. A. S. D.; Obtenção do ponto de carga zero de materiais adsorventes; VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar. CESUMAR: Maringá, **2013**, 1. http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2013/oit_mostra/Mara_Helen_da%20Silva_Deolin.pdf.
28. PÉREZ, D. V.; CAMPOS, D. V. B.; TEIXEIRA, P. C.; Ponto de carga zero (PCZ); Manual de métodos de análise de solos; Embrapa: Brasília, **2017**, cap. 3a, p. 573. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172325/1/Pt-2-Cap-9-Ponto-de-carga-zero.pdf>.

Marcos V. A. Mendes^{1*} & Vanessa N. Alves²

¹Universidade Federal de Catalão, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas, Catalão, Goiás, Brasil.

²Universidade Federal de Catalão, Instituto de Química, Catalão, Goiás, Brasil..

*E-mail: marcos.vinicius@ufcat.edu.br