



APLICAÇÃO DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE PETRÓLEO COMO ADSORVENTE PARA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR MINERAÇÃO

Eduarda F. Barboza¹; Gabrielle M. Ferreira²; Aline A. Freitas²; Diane O. Laroque²; Sebastião R. Soares²; Armando B. C. Júnior²

¹ Departamento de Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

² Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

eduarda.formentin@grad.ufsc.br

Palavras-Chave: Valorização de resíduo, drenagem ácida, água impactada

Introdução

O aumento na demanda energética global impulsionou a expansão do setor de petróleo e gás, intensificando a geração de resíduos industriais, entre os quais sobressaem os cascalhos de perfuração [1,2]. Quando provenientes do uso de fluidos de perfuração de base orgânica, esses resíduos constituem um desafio para a gestão ambiental da indústria petrolífera devido ao elevado teor de contaminantes orgânicos e à sua toxicidade, decorrente da presença de aditivos químicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) [3]. Essa composição complexa inviabiliza seu descarte direto em aterros, tornando necessária a adoção de tecnologias capazes de reduzir seus impactos ambientais ou, de forma mais sustentável, promover sua reinserção na cadeia produtiva por meio de estratégias de valorização.

Nesse contexto, o emprego dos cascalhos tratados como adsorventes tem emergido como uma alternativa promissora para a remoção de contaminantes metálicos e iônicos em matrizes aquosas. Além de agregar valor a um resíduo industrial, essa estratégia apresenta simplicidade operacional, reduzida geração de resíduos secundários e uma relação custo-benefício favorável quando comparada a processos convencionais, como a precipitação química e a filtração por membranas [4].

Entre os efluentes que demandam tecnologias eficientes para remoção de metais destacam-se aqueles provenientes da mineração de carvão. Na Bacia Carbonífera Sul-Catarinense, responsável pelo abastecimento da Usina Termoeletrica Jorge Lacerda, em Capivari de Baixo (SC), a exploração do carvão mineral gera importantes passivos ambientais, especialmente a Drenagem Ácida de Mina (DAM) e a Água Impactada por Mina (AIM) [5,6]. A DAM é produzida pela oxidação da pirita (FeS_2) em contato com água e oxigênio, processo que libera íons hidrogênio (H^+), sulfato (SO_4^{2-}) e cátions metálicos potencialmente tóxicos. A contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos por esse processo resulta na AIM, caracterizada por elevada acidez e altas concentrações de metais dissolvidos [6,7]. Esses



contaminantes comprometem a qualidade ambiental, promovem alterações nos ecossistemas aquáticos, reduzem a biodiversidade e representam riscos à saúde humana [8].

Considerando a elevada concentração de espécies metálicas presentes nestas matrizes, o reaproveitamento de cascalhos de perfuração como adsorvente constitui uma alternativa capaz de integrar dois importantes passivos ambientais em uma única estratégia tecnológica, conciliando o tratamento de águas contaminadas com a valorização de resíduos da indústria do petróleo.

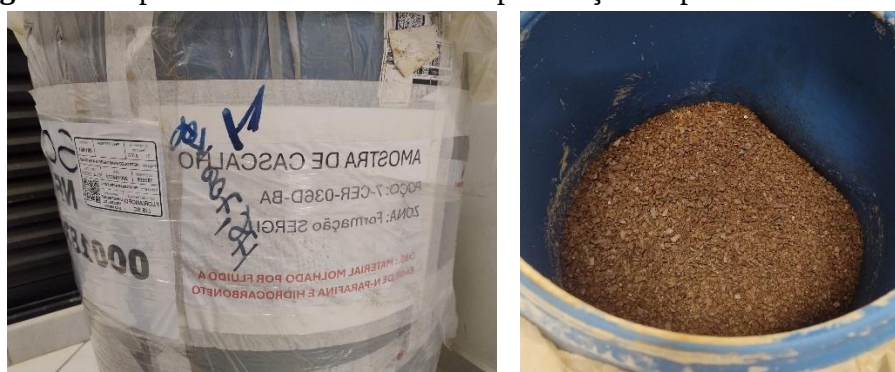
A eficiência dessa abordagem está diretamente relacionada às características mineralógicas do cascalho. Diferentemente do carvão ativado, cuja elevada área superficial e estrutura microporosa favorecem predominantemente mecanismos de adsorção física (forças de Van der Waals), o cascalho atua como um adsorvente inorgânico, apresentando porosidade majoritariamente interparticular, composta por mesoporos e macroporos. Sua superfície, rica em aluminossilicatos e carbonatos, favorece mecanismos de troca iônica e atração eletrostática, responsáveis pela retenção de íons metálicos dissolvidos [9,10]. Essas características conferem ao material potencial para aplicação no tratamento de efluentes contaminados por metais, ao mesmo tempo em que promovem uma rota alinhada aos princípios da economia circular.

Material e Métodos

2.1 Origem do Cascalho

Os cascalhos utilizados nos testes experimentais são provenientes de poço de perfuração onshore (poço 7-CER-036D-BA), na bacia localizada no estado da Bahia, e foram fornecidos pela empresa Petrobras SA.

Figura 1. Aspecto visual do cascalho de perfuração de petróleo utilizado no estudo



Fonte: Autora

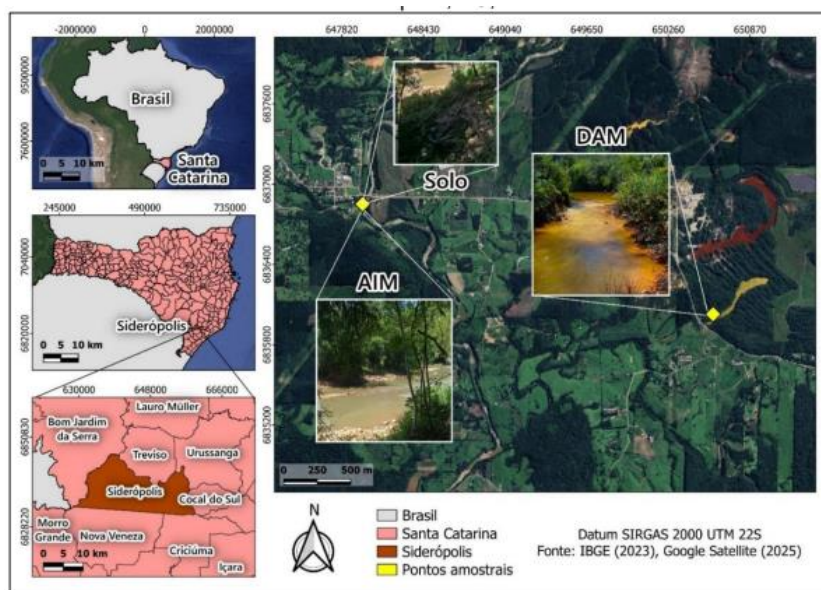
2.2 Área de Estudo

Com base no trabalho de Kruze [11] a coleta das amostras foi estabelecida em locais no município de Siderópolis (SC). A amostragem foi realizada de forma idêntica à referida, selecionando-se os pontos 1 e 5 para representar dois cenários distintos da dinâmica hídrica afetada pela mineração (Figura 2). O Ponto 1 (DAM) localizado no corpo d'água Língua do Dragão, caracterizando uma fonte de contaminação com acentuada acidez e elevadas



concentrações de metais e sulfato. Por sua vez, o Ponto 5 (AIM) situado no Rio Mãe Luzia, funcionando como uma zona de transporte onde os contaminantes são carregados a jusante para um ambiente aquático de características mais neutras.

Figura 2. Área de estudo e pontos de amostragem da DAM e AIM em Siderópolis-SC



Fonte: [9]

2.3 Preparo da Amostra

O cascalho de perfuração foi inicialmente submetido à secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Após a secagem, o material foi triturado, homogeneizado e peneirado em peneira com granulometria de 45 mesh (abertura de 0,355 mm).

2.4 Ensaio de Cinética de Adsorção

Para os ensaios de remediação por adsorção, 0,25g do cascalho seco, triturado e peneirado foram pesadas e transferidas para frascos Erlenmeyer de 125mL, aos quais foram adicionados 50mL das amostras de DAM e AIM. O sistema foi mantido sob agitação orbital em uma mesa agitadora (shaker) a temperatura ambiente pelos tempos predeterminados de 5, 10 e 15 minutos, realizando-se os experimentos em duplicata para cada intervalo de tempo.

2.5 Separação de Fases e Centrifugação

Decorridos os respectivos tempos de agitação, o conteúdo de cada Erlenmeyer foi transferido para tubos Falcon de 50mL. A separação das fases sólida e líquida foi realizada por centrifugação a 4000 rpm durante 5 minutos.

2.6 Análises Instrumentais

A medição do pH foi realizada por método potenciométrico em pHmetro de bancada digital, sendo as amostras analisadas em temperatura ambiente e sob agitação constante até a



estabilização do sinal. As análises de quantificação dos metais (Fe, Mg, Mn e Zn) nas amostras brutas e pós-tratamento por adsorção foram realizadas por Espectrometria de Absorção Atômica por Chama – FAAS (SpectraAA 50B, Varian), utilizando curvas analíticas obtidas por calibração externa.

Resultados e Discussão

3.1 Monitoramento do pH

A variação do pH das amostras de DAM e AIM em função do tempo de contato com o cascalho de perfuração é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de pH das matrizes de DAM e AIM antes (bruta) e após o tratamento com cascalho de perfuração em diferentes tempos de adsorção

Matriz / Amostra	Drenagem Ácida (DAM)	Água Impactada (AIM)
Bruta	2,80	7,06
5 minutos	2,98	8,63
10 minutos	2,95	8,59
15 minutos	2,92	8,60

A avaliação da cinética de variação do pH mostrou que, em ambas as matrizes, o equilíbrio foi atingido rapidamente, com estabilização observada já nos primeiros 5 minutos de contato e manutenção de valores praticamente constantes até 15 minutos. Essa rápida estabilização é característica de reações superficiais de troca iônica e da rápida dissolução de fases minerais solúveis contidas no cascalho.

Para a amostra de AIM, constatou-se uma elevação expressiva do pH, passando de 7,06 (condição neutra) na água bruta para valores em torno de 8,60 após o contato com o adsorvente. Esse incremento evidencia o caráter alcalinizante do cascalho de perfuração, decorrente da presença de compostos de caráter básico na rocha e nos fluidos de perfuração, tais como carbonatos e aluminossilicatos.

Por outro lado, na matriz de DAM, o pH inicial extremamente ácido (2,80) apresentou um ligeiro aumento, estabilizando-se em 2,95 após 15 minutos. A modesta variação no pH da DAM decorre da elevada capacidade tampão do efluente, sustentada pela alta concentração de íons H^+ livre e espécies ácidas provenientes da oxidação da pirita (FeS_2).

3.2 Quantificação de metais por FAAS

As concentrações brutas e residuais e os respectivos percentuais de remoção dos metais ferro (Fe), magnésio (Mg), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas matrizes de DAM e AIM são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Concentrações dos metais (Fe, Mg, Mn e Zn) nas amostras DAM e AIM brutas e pós-tratamento (5, 10 e 15 min), e os respectivos percentuais de remoção obtidos.

Amostra		Fe		Mg		Mn		Zn	
		mg L ⁻¹	Remoção (%)	mg L ⁻¹	Remoção (%)	mg L ⁻¹	Remoção (%)	mg L ⁻¹	Remoção (%)
DAM	Bruta	819,10	-	100,86	-	29,32	-	4,10	-
	5 min	640,40	21,82	95,13	5,68	27,92	4,77	3,67	10,34
	10 min	650,30	20,61	99,66	1,19	28,24	3,68	3,57	12,85
	15 min	672,70	17,88	100,24	0,61	28,60	2,45	3,54	13,63
AIM	Bruta	0,10	-	4,86	-	0,31	-	ND*	-
	5 min	0,07	24,72	4,56	6,18	0,08	73,02	ND*	-
	10 min	0,06	36,63	4,54	6,62	0,08	74,30	ND*	-
	15 min	0,09	11,88	4,64	4,69	0,07	77,14	ND*	-

3.2.1 Remoção de metais na DAM:

Na matriz de Drenagem Ácida de Mina (DAM), o cascalho apresentou desempenho limitado na remoção dos metais avaliados. O ferro (Fe) apresentou a maior eficiência, com remoção máxima de 21,82% nos primeiros 5 minutos, reduzindo sua concentração de 819,10 para 640,40 mg L⁻¹. A estabilização das concentrações nos tempos subsequentes sugere que a maior parte da remoção ocorreu rapidamente, possivelmente em decorrência da ocupação dos sítios ativos disponíveis. O zinco (Zn) apresentou aumento gradual da eficiência ao longo do ensaio, alcançando 13,63% após 15 minutos de contato, enquanto magnésio (Mg) e manganês (Mn) apresentaram baixas remoções, inferiores a 5,68% e 4,78%, respectivamente.

A baixa eficiência global observada na DAM está associada à manutenção do meio em condição fortemente ácida (pH $\approx$ 2,95). Nessa faixa de pH, a elevada concentração de íons H⁺ promove a protonação da superfície do adsorvente, reduzindo a disponibilidade de sítios ativos para retenção de cátions metálicos e intensificando a competição pelos locais de adsorção. Além disso, a acidez impede a formação de hidróxidos metálicos pouco solúveis, limitando a contribuição de mecanismos de precipitação para a remoção dos metais. Em conjunto, esses fatores restringem a eficiência do cascalho no tratamento da DAM nas condições avaliadas.

3.2.2 Remoção de metais na AIM:

Em contraste com a DAM, a aplicação do cascalho como adsorvente na matriz de Água Impactada por Mina (AIM) apresentou desempenho significativamente superior na remoção dos metais avaliados. O manganês (Mn) apresentou a maior eficiência, com remoção de 73,02% já nos primeiros 5 minutos de contato, atingindo 77,14% aos 15 minutos e reduzindo sua concentração residual de 0,31 para 0,07 mg L⁻¹. O ferro (Fe) também apresentou remoção



expressiva, alcançando eficiência máxima de 36,63% após 10 minutos de contato, enquanto o magnésio (Mg) apresentou remoção moderada, variando entre 4,69% e 6,62%.

O desempenho observado está associado à elevação do pH da solução para aproximadamente 8,60 após o contato com o cascalho. Nessa condição alcalina, a desprotonação dos grupos superficiais do adsorvente aumenta a densidade de cargas negativas e, conseqüentemente, a disponibilidade de sítios ativos para retenção de cátions metálicos por atração eletrostática e troca iônica. Paralelamente, o aumento do pH favorece a formação de hidróxidos e carbonatos metálicos de baixa solubilidade, contribuindo para a remoção dos metais por precipitação. A atuação simultânea desses mecanismos explica a elevada eficiência observada, especialmente para manganês e ferro.

Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que o cascalho de perfuração de petróleo possui promissor potencial de aplicação como material adsorvente e agente de neutralização no tratamento de águas contaminadas por atividades de mineração.

Na matriz de AIM, o material promoveu a elevação do pH de 7,06 para aproximadamente 8,60 e alcançou eficiência de remoção de manganês superior a 77% após apenas 15 minutos de contato, evidenciando seu potencial para remediação de efluentes com menor carga ácida. Em contrapartida, na DAM embora tenha sido observada remoção inicial de ferro (~21,8%), a elevada acidez e a capacidade tamponante do meio limitaram a neutralização e, conseqüentemente, a remoção global dos metais. Esses resultados indicam que a aplicação do cascalho constitui uma estratégia promissora de valorização de resíduos, integrada aos princípios da economia circular.

Como continuidade deste estudo, propõe-se avaliar o efeito de maiores dosagens de adsorvente e de sistemas em múltiplos estágios, visando superar a capacidade tamponante da DAM e aumentar a eficiência de remoção de metais. Também será realizada a caracterização físico-química do cascalho antes e após a adsorção, por meio de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e determinação da área superficial específica (BET), com o objetivo de elucidar os mecanismos predominantes de retenção metálica. Adicionalmente, pretende-se ajustar modelos cinéticos de adsorção e realizar ensaios de lixiviação e ecotoxicidade do material e do efluente tratado, a fim de avaliar a estabilidade dos metais retidos e a segurança ambiental da tecnologia proposta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo fomento da pesquisa, ao CICLOG pelo suporte técnico e institucional, e ao Projeto CP3R pela infraestrutura e pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.



Referências

1. Xie, B.; Qin, J.; Sun, H.; Wang, S.; Li, X. Leaching Behavior of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Oil-Based Residues of Shale Gas Drill Cuttings. *Environmental Pollution* **2021**, *288*, doi:10.1016/j.envpol.2021.117773.
2. Hu, Y.; Mu, S.; Zhang, J.; Li, Q. Regional Distribution, Properties, Treatment Technologies, and Resource Utilization of Oil-Based Drilling Cuttings: A Review. *Chemosphere* **2022**, *308*.
3. Pereira, L.B.; Sad, C.M.S.; Castro, E.V.R.; Filgueiras, P.R.; Lacerda, V. Environmental Impacts Related to Drilling Fluid Waste and Treatment Methods: A Critical Review. *Fuel* **2022**, *310*.
4. Satyam, S.; Patra, S. Innovations and Challenges in Adsorption-Based Wastewater Remediation: A Comprehensive Review. *Heliyon* **2024**, *10*, doi:10.1016/j.heliyon.2024.e29573.
5. Kruze, L.S. Remediação de Águas Contaminadas Pela Mineração de Carvão Com o Uso de Adsorventes de Origem Carbonácea e Geopolimérica Visando a Redução Da Toxicidade Em Enchytraeus Crypticus, Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2025.
6. Kruze, L.S.; Tochetto, G.; Freitas, A.A.; Filho, L.C.I.O.; Colombo, P.; Hotza, D.; Nagel-Hassemer, M.E. Physicochemical Remediation of Coal Mining Water Using Carbonaceous and Geopolymeric Adsorbents to Reduce Toxicity to Enchytraeus Crypticus. *Water Air Soil Pollut.* **2026**, *237*, doi:10.1007/s11270-026-09196-8.
7. Núñez-Gómez, D.; Alves, A.A. de A.; Lapolli, F.R.; Lobo-Recio, M.A. Application of the Statistical Experimental Design to Optimize Mine-Impacted Water (MIW) Remediation Using Shrimp-Shell. *Chemosphere* **2017**, *167*, 322–329, doi:10.1016/j.chemosphere.2016.09.094.
8. Rodrigues, C.; Núñez-Gómez, D.; Follmann, H.V.D.M.; Silveira, D.D.; Nagel-Hassemer, M.E.; Lapolli, F.R.; Lobo-Recio, M.Á. Biostimulation of Sulfate-Reducing Bacteria and Metallic Ions Removal from Coal Mine-Impacted Water (MIW) Using Shrimp Shell as Treatment Agent. *J. Hazard. Mater.* **2020**, *398*, doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122893.
9. LI, Jiashi; DONG, Xiaoqiang; LIU, Xiaofeng; XU, Xin; DUAN, Wei; PARK, Junboun; GAO, Lei; LU, Yisi. **Comparative study on the adsorption characteristics of heavy metal ions by activated carbon and selected natural adsorbents**. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 23, p. 15579, 2022. DOI: 10.3390/su142315579. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142315579>. Acesso em: 30 jul. 2026.
10. NEMEŞ, Nicoleta Sorina; NEGREA, Adina; CIOPEC, Mihaela; NEGREA, Petru; DUȚEANU, Narcis; DUDA-SEIMAN, Daniel Marius. **Heavy metal ion removal: a global review of wastewater treatment technologies**. *International Journal of Molecular Sciences*, Basel, v. 27, n. 4, art. 1741, 2026. DOI: 10.3390/ijms27041741. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms27041741>. Acesso em: 30 jul. 2026.
11. Kruze, L.S.; Tochetto, G.; Freitas, A.A.; Filho, L.C.I.O.; Colombo, P.; Hotza, D.; Nagel-Hassemer, M.E. Physicochemical Remediation of Coal Mining Water Using Carbonaceous and Geopolymeric Adsorbents to Reduce Toxicity to Enchytraeus Crypticus. *Water Air Soil Pollut.* **2026**, *237*, doi:10.1007/s11270-026-09196-8.