

Aplicação de Wetlands Construídas como Alternativa na Descaracterização de Barragem de Contenção de Sedimentos

Henrique de Albuquerque Mota Castelo Branco
Engenheiro Geotécnico, TRACTEBEL, Belo Horizonte, Brasil, henrique.castelo@tractebel.engie.com

Vitor Rocco Albernaz
Engenheiro Hidrólogo, TRACTEBEL, Belo Horizonte, Brasil, vitor.albernaz@tractebel.engie.com

O Brasil vivenciou dois casos emblemáticos de desastres ambientais de grandes proporções ligados à atividade minerária, a ruptura da barragem de Fundão em Mariana/MG e a ruptura da Barragem B1, localizada na cidade de Brumadinho/MG. Após esses eventos, a legislação brasileira sobre barragens mudou consideravelmente, dentre as mudanças destaca-se a obrigação da remoção de todas as barragens alteadas a montante bem como aumento das atividades de manutenção e monitoramento, em consequência disso, tem-se um incentivo à descaracterização de barragens. Porém, a mineração se mantém como um potencial poluidor do meio ambiente, e assim necessita-se de dispositivos que tenham a função de promover a melhora na qualidade dos efluentes antes de seu lançamento. Este artigo aborda a aplicação de uma solução para a descaracterização de estruturas geotécnicas em que se deseja promover a melhora do efluente, principalmente no que tange a remoção de metais dissolvidos, como ferro e manganês, adotando uma abordagem de Solução Baseada na Natureza (SBN). Como objetivo principal do estudo tem-se a conceitualização dos tipos de wetlands adotados na mineração e levantamento bibliográfico de casos em que a solução foi adotada.

PALAVRAS-CHAVE: *Wetlands*, Soluções Baseadas na Natureza, Sustentabilidade, Descaracterização de Barragens.

ABSTRACT: Brazil has witnessed two emblematic cases of large-scale environmental disasters linked to mining activities: the Fundão dam failure in Mariana, MG and the B1 dam failure in Brumadinho, MG. Following these events, the dam's legal regulatory standards have undergone significant changes, including the obligation to remove all upstream tailings dams, as well as increased maintenance and monitoring activities. As a result, there has been an incentive for dam decommissioning. However, mining remains a potential environmental pollutant, necessitating measures to improve effluent quality before discharge. This paper addresses the application of a solution for the decommissioning of geotechnical structures aimed at improving effluent, particularly in terms of removing dissolved metals such as iron and manganese, adopting a Nature-Based Solution (NBS) approach. The main objective of the study is to conceptualize the types of wetlands adopted in mining and conduct a literature review of cases where the solution has been applied.

KEYWORDS: Wetlands, Nature-Based Solution, Sustainability, Decommissioning of Dams.

1.0 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração é essencial para o desenvolvimento humano. A maioria dos materiais utilizados atualmente em aplicações industriais, novas tecnologias e geração energética, é fruto de processos extrativos e de processamento de minérios (Hatje et al., 2017), entretanto, as atividades de mineração também estão associadas a sérios problemas ambientais que podem ter impactos significativos na saúde humana e no meio ambiente.

Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho serviram como alarmantes lembretes dos perigos inerentes à atividade minerária. O desastre de Mariana foi o rompimento da Barragem de Fundão que ocorreu no dia 5 de novembro de 2015, na cidade de Mariana localizada no estado de Minas Gerais, o evento desencadeou uma onda de rejeitos, estimados em 43 mi m³, que escoou pelo rio Doce (Garcia *et al.*, 2007) até chegar no Oceano Atlântico após percorrer cerca de 665 km (Aires *et al.*, 2018). No caso do desastre de

Brumadinho, também em Minas Gerais, onde ocorreu o rompimento da Barragem B1 no ano de 2019, com o lançamento de 11 mi m³ de rejeitos ao longo de 10 km do rio Paraopebas. Até janeiro de 2020, foram confirmadas 259 mortes e 11 pessoas continuavam desaparecidas (Rotta *et al.*, 2020).

Tendo em vista esses desastres, a Agência Nacional de Mineração (ANM) elaborou a Resolução nº 95/2022, que representa um marco importante na consolidação dos atos normativos de segurança de barragens no Brasil. Posteriormente, a resolução foi revisada pela Resolução nº 130/2023, onde dentre algumas alterações, adicionou-se definições acerca do sistema de monitoramento a ser implementado e operado após a descaracterização das estruturas. Essas resoluções representam um importante avanço do arcabouço legislativo e normativo brasileiro acerca do setor minerário.

Essas novas normativas proporcionaram um cenário propenso para as mineradoras promovessem a descaracterização de suas barragens. De acordo com o Art. 2º da Resolução ANM nº 130, barragem descaracterizada é aquela que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos ou sedimentos oriundos de sua atividade fim e que deixa de possuir características ou exercer função de barragem. Ainda, dentre as etapas necessárias, a estabilização física e química de longo prazo das estruturas remanescentes é obrigatória.

Entretanto, existe um dilema significativo: embora as barragens de rejeitos e sedimentos causem um impacto ambiental considerável, elas desempenham um papel crucial no armazenamento dos resíduos da mineração. A desativação dessas barragens exige, portanto, a busca por outras soluções que permitam a continuidade das operações minerárias.

Atualmente, há progresso no uso de pilhas secas para armazenar resíduos, substituindo as barragens. Contudo, as pilhas ainda são suscetíveis a agentes naturais, como a infiltração de água de nascentes ou aquíferos e a precipitação sobre a estrutura, o que pode resultar na produção de um efluente industrial com contaminantes, causando impactos negativos ao meio ambiente.

Para mitigar esses impactos, é fundamental adotar medidas de controle e tratamento adequadas. Neste contexto, há um crescente interesse em soluções de tratamento de efluentes do tipo passivo, com destaque para as *wetlands* construídas. Esses sistemas oferecem uma alternativa sustentável e eficiente para o tratamento de águas contaminadas, proporcionando benefícios adicionais como a recuperação de áreas degradadas e a promoção da biodiversidade aquática.

Assim, este estudo concentra-se especificamente em *wetlands* construídos devido à sua importância ecológica e capacidade única de filtrar e degradar uma variedade de poluentes na água. As *wetlands* são conhecidas por sua capacidade de melhorar a qualidade da água, fornecer *habitat* para a vida selvagem e assim ajudar a mitigar as mudanças climáticas, tornando-as um foco relevante para a pesquisa em questão. Este artigo propõe um levantamento bibliográfico de casos em que *wetlands* construídas foram aplicadas com sucesso para tratar rejeitos de mineração.

2.0 WETLANDS CONSTRUÍDAS (WC)

Os sistemas de *wetlands*, também conhecidos como sistemas alagados construídos, reproduzem as condições de *wetlands* naturais para o tratamento de efluentes (Vymazal, 2011). Feitos com solo, rocha britada e plantas próprias desses ambientes, esses sistemas podem adotar diferentes configurações: *free-water surface* (FWS) ou de superfície, *subsurface flow* (SF) ou de subsuperfície ou do tipo híbrida (Kadlec & Wallace, 2008), sendo que as WC de subsuperfície também são divididas em de fluxo horizontal (*horizontal subsurface flow* – HSSF) e de fluxo vertical (*vertical subsurface flow* – VSSF) (IWA, 2000). O sistema de superfície, similar aos *wetlands* naturais, proporciona um tratamento aeróbio, enquanto o de subsuperfície utiliza substrato poroso para a absorção de contaminantes (Gersberg *et al.*, 1986). Já o sistema híbrido, que combina ambos, oferece uma eficiência versátil de tratamento (Reddy e DeLaune, 2008).

O tipo de *wetland* construído a ser implementado depende de diversos fatores, como tamanho, custo, operacionalidade, entre outros. A eficiência na remoção de contaminantes diferencia para cada tipo, com a vantagem da FWS para alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), SST, amônia, nitrogênio total e fósforo, já as HSSF são mais eficazes para níveis terciários de DBO, nitrato e patógenos (Kadlec, R. H. 2009).

Na década de 1980, um grande número de WC foram construídos com o foco em tratar a drenagem ácida de minas nos Estados Unidos (Wieder, 1989). Foram utilizadas principalmente com o foco em aumentar o pH da água e reduzir as concentrações de ferro e manganês, normalmente em minas de carvão (Kleinman, R.L.P., Hedín, R., 1989). O tratamento convencional de lixiviados nesses locais incluiria nivelamento e

remodelação da superfície (FWS) para reduzir ou desviar os fluxos, e tamponamento químico e precipitação para melhorar a qualidade da água (Kadlec, R. H. e Wallace, S. D., 2008).

As *wetlands* construídas de subsuperfície, por outro lado, são promissoras para o tratamento eficiente de metais pesados em efluentes, priorizando a utilização de plantas e meios filtrantes alternativos de baixo custo para potencializar a remoção desses poluentes (Saeed, T. *et al.*, 2021).

Para este trabalho, consolidou-se, por meio da análise de diversos artigos, diversas aplicações dos sistemas de *wetlands* construídos, com o objetivo de analisar a eficiência de cada tipo de WC na remoção dos principais metais contaminantes, associado também o pH do meio e o tipo de escala¹.

Apresenta-se na Tabela 1 uma síntese do uso de WC para tratar casos relacionados ao setor minerário para remoção de metais dos efluentes. Ressalta-se que parte dos artigos não apresentavam as cargas de material que aflui aos sistemas (*Inflow*), nem estava claro o pH do meio e a escala das estruturas, nesses casos a tabela foi mantida sem preenchimento (-).

Tabela 1. Tipos de WC para remoção de metais e características operacionais.

Tipo de WC	Metais	<i>Inflow</i>	% Metal Removido	Meio	Escala	Referência
SSF	Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb	- ²	78; 75; 77; 56; 75; 84	-	-	Sinicrope <i>et al.</i> (1992)
FSW	Fe, Mn	69,5; 1,34	80,57; -8,21 ³	Neutro	Larga	Stark (1994)
FSW	Fe, Mn	6,0; 5,1	76,7; 37,2	Ácido	Larga	Masferrer <i>et al.</i> (2002)
FSW	Fe; Mn	-	76,3; 22,0	Ácido	-	Maine <i>et al.</i> (2006)
FSW	Fe; Cr; Ni	-	95; 86; 67	Alcalino	Larga	Fu <i>et al.</i> (2022)
SFW	Fe; Mn; Cu; Zn; Pb; SO ₄ -	-	91,5; 47,83; 65,7; 7; 61,14; 57,66; 5,43	Neutro	Laboratório	
NW ⁴	Fe; Mn; Cu; Zn; Pb; SO ₄ -	-	97,25; 100; 68,02; 82,12; 100; 85,21	Alcalino	Laboratório	
FSW	Fe; Mn; Al; Zn; Cd; B; As; Pb	44; 5,9; 0,02; -; -; 10; 0,85; -	98; 79; -; -; -; -; 100;-	-	Larga	Mays <i>et al.</i> (2001)
FSW	Fe; Mn; Al; Zn; Cd; B; As; Pb	205; 7,4; 0,29; 30; 20; 1070; 100; 2,2	97; 47; -; 33; 100; 52; 99; 26	-	Larga	
NW ²	Fe; Mn; Al;	1,29; 0,20; 0,10	10; 40; -;	-	Larga	
HSSF	As; Mn; Zn; Cd; Pb	0,1; 1,34; 0,26; 0,21; 0,27	75,1; 98,8; 30,2; 83,7; 42,8	-	-	Nguyen <i>et al.</i> (2019)
SFW	As; Mn; Zn; Pb	2,6; 4; 1,5; 0,6	80,5; 91,2; 78,9; 73,5	-	-	Ha <i>et al.</i> (2017)
HSSF	As; Mn; Zn; Pb	2,6; 4; 1,5; 0,6	83,1; 94,1; 81,7; 81,1	-	-	

¹ A escala refere-se ao tamanho do sistema *wetland* construído, podendo ser como de bancada ou laboratório, pequena ou larga. Esse parâmetro auxilia a entender as dimensões do sistema para os diferentes casos de referência.

² Não consta a informação clara nos referentes artigos.

³ O valor encontra-se negativo (-) na referência indicando que teve um aumento na concentração de manganês para o caso.

⁴ NW – *Natural Wetlands* – Alagados naturais.

SFW	Al; Ca; Fe; Mg; Mn; S;	-	30;8;31;17;19;18	Muito Ácido	Larga	Woulds e Ngwenya (2004)
SFW	Fe; Cu; Zn; Pb; Co; Ni; Mn	17,861; 14,62; 29,367; 1,753; 0,323; 0,388; 2,143	96; 92; 78; 90; 72; 64; 76	Ácido	Laboratório	Dufresne <i>et al.</i> (2015)
HSSF	Al; Fe; Mn	12,6; 787; 10,9	95,8; 99,9; 98,4	Ácido	Larga	Karathanasis e Johnson (2003)
HSSF	B; Ca; Mn; Na	187; 54,9; 19,6; 318	37; 25; 34; 33,5	Alcalino	Pequena	Nyquist e Greger (2009)
HSSF	Fe; Mn; Ni; Zn	38,1; 2,6; 0,4; 9	-	Ácido	Pequena	Dufresne <i>et al.</i> (2015)
Híbrida FSW- SSW	Fe; Al; Mn	166; 83; 250	82,35; 61,25; 94,9	Ácido	Larga	Mitsch e Wise (1998)

3.0 DISCUSSÃO

A partir da consolidação dos dados apresentados na Tabela 1, verifica-se que o fator escala afeta consideravelmente a remoção dos metais nas *wetlands* construídas. Grande parte dos resultados em escala de laboratório apresentaram porcentagens de remoção do metal em questão acima de 90%. Os resultados, no geral, apresentaram uma tendência de redução da eficiência, à medida que se aumentou a escala do sistema.

É possível observar também que o fator do pH é imprescindível para a eficiência do tratamento. Os processos químicos, como oxidação e hidrólise, que proporcionam a diminuição das concentrações de certos metais, têm grande influência tanto na solubilidade destes metais como na cinética das reações químicas destes elementos. De acordo com o manual da EPA (2017), águas de drenagem de mina classificadas como alcalinas podem ser tratadas com *wetlands* aeróbicos de fluxo horizontal, pois possuem alcalinidade suficiente para neutralizar a acidez causada pelas reações de hidrólise dos metais, e assim possibilitar a precipitação destes por oxidação.

Outra variável que afeta a eficiência destes sistemas é o tempo de detenção do efluente, sendo este fator avaliado pela diferença entre o volume do reservatório e a vazão média diária. O tempo de detenção ideal, portanto, é sensível principalmente à variação da capacidade máxima do reservatório, bem como à vazão do efluente. Ressalta-se que, a depender do metal, o tempo para que sua remoção seja ideal pode ser acima do tempo de detenção do sistema. Ainda, há uma certa influência no quesito velocidade de chegada destes efluentes, a depender do método necessário para a deposição, o fluxo turbulento pode auxiliar ou atrapalhar nos processos de remoção dos metais.

Outro fator que afeta a precipitação dos metais é a influência que os processos de deposição de um metal influenciam na de outro metal, como por exemplo o ferro e manganês, dos quais, em um mesmo sistema, sua precipitação ocorre de forma sequencial, dado que os precipitados de manganês oxidado são instáveis na presença de Fe^{2+} .

Ainda, tem-se o fator da profundidade de construção do sistema de *wetlands*. Lâminas d'água mais rasas (< 15 cm) possibilitam maior aeração, porém, a vida útil se tornará menor devido à deposição dos precipitados (menor tempo de detenção). Já sistemas mais profundos (entre 20 e 60 cm) apresentam problemas com redução da diversidade de plantas, resultam em deficiência de oxigênio na camada próxima ao substrato e redução da oxidação de metais, porém, possibilitam um tempo útil maior. Hedin *et al.* (1994) sugerem a utilização de células de *wetlands* construídos que intercalam sistemas rasos e mais profundos, de forma a melhor se adaptar às variações sazonais de vazão.

4.0 CONCLUSÃO

A presente análise buscou elaborar uma base consolidada de diferentes aplicações de tratamento de efluentes por sistemas de *Wetlands* Construídas (WC) no setor de mineração. Esses sistemas têm demonstrado eficiência no tratamento de efluentes provenientes da atividade minerária. Classificados como métodos de tratamento passivo, eles oferecem a vantagem de baixos custos operacionais e de manutenção. No entanto, é importante destacar que esses dispositivos são vulneráveis a condições climáticas adversas e possuem limitações para tratar efluentes com concentrações extremamente elevadas de contaminantes.

Ainda há muito a ser feito para a implementação efetiva desses sistemas no setor de mineração. Os desafios que permanecem incluem a área requerida para a construção do WC, a eficiência do sistema em relação à sazonalidade e variações de pH, e a manutenção do sistema, especialmente a remoção dos precipitados. Também são desafios de implementação a escolha do tipo de solo, tipos de planta com base na qualidade da água e tipos de materiais a serem utilizados (Macfarlane *et al.*, 2016).

Uma abordagem promissora para otimizar a eficiência dos sistemas de WC é considerar a implementação de tratamentos secundários ou a adoção de WC em série, aumentando a capacidade de remoção de contaminantes e melhorando a adaptação às variações sazonais de vazão e composição dos efluentes. Essas estratégias aprimoram o desempenho dos sistemas, e com isso mitigam parte dos impactos ambientais associados às atividades minerárias, promovendo assim uma gestão mais sustentável desses recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à TRACTEBEL ENGINEERING LTDA por providenciar material necessário para a realização deste artigo e incentivar o seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires, U.R.V., Santos, B.S.M., Coelho, C.D., Silva, D.D., Calijuri, M.L. (2018). Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. *Land Use Policy*, v. 70, p. 63-70.
- Busnardo, M.J., Gersberg, R.M., Langis, R., Sinicrope, T.L., Zedler J.B. (1992) Nitrogen and phosphorus removal by wetland mesocosms subjected to different hydroperiods. *Ecological Engineering*, v. 1(4), p. 287-307.
- Dufresne, K., Neculita, C.M., Brisson, J., Genty, T. (2015) *Metal Retention Mechanisms in Pilot-Scale Constructed Wetlands Receiving Acid Mine Drainage*. 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference, Santiago, Chile, v. 1, p. 1235-1241.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2017) *Water Quality Standards Handbook*. EPA Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- Fu, T., Wu, Y., Wang, H., Chen, K., Zeng, Y., Wen, Z., Ran, Z., He, L. (2022) The Combined Application of Surface Floating Wetlands and Bottom Anaerobic to Remediate AMD-Contaminated Lakes. *Journal of Chemistry*, v. 2022, 5867768.
- Garcia, L.C., Ribeiro, D.B., Roque, F.O., Ochoa-Quintero, J.M., Laurance, W.F. (2017) Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay actual environmental costs. *Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America*, v. 27, p. 5-9.
- Gersberg, R. M., *et al.* (1986). The removal of heavy metals by natural zeolites. *Water Research*, v. 20(6), p. 727-734.
- Hedin, R.S., Watzlaf, G.R., Nairn, R.W. (1994) Passive Treatment of Acid Mine Drainage with Limestone. *Journal of Environmental Quality*, v. 23(6), p. 1337-1345.
- IWA. (2000) *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Publishing, London, UK, 156 pp.

- Kadlec, R. H., Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands*, 2nd Edition. CRC Press, 1016 p.
- Kadlec, R. H. (2009) Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering*, v. 35(2), p. 159-174.
- Karathanasis, A.D., Johnson, C.M. (2003) Metal Removal Potential by Three Aquatic Plants in an Acid Mine Drainage Wetland. *Mine Water and the Environment*, v. 22, p. 22-30.
- Kleinman R.L.P., Hedin R. (1989) *Biological Treatment of Mine Water*. Tailings and Effluent Management: Proceedings of the International Symposium on Tailings and Effluent Management, p. 20-24.
- Macfarlane, D., Kassier, D., Dlamini, B.M., Dini, J., Marneweck, G., Campbell, J., Young, A., Holness, S.D., Klerk, A.R., Oberholster, P.J., Ginsburg, A. (2016) Wetland Rehabilitation in Mining Landscapes: An Introductory Guide. Water Research Commission, WRC Report n° TT 658/16.
- Maine, M.A., Sune, N., Hadad, H., Sánchez, G., Bonetto, C. (2006) Nutrient and metal removal in a constructed wetland for waste-water treatment from a metallurgic industry. *Ecological Engineering*, v. 26(4), p. 341-347.
- Masferrer, J.A.R. (2002) Passive treatment of acid mine drainage at the La Extranjera Mine (Puertollano, Spain). *Mine Water and the Environment*, v. 21, p. 111-113.
- Mays, P.A., Edwards, G.S. (2001) Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Ecological Engineering*, v.16(4), p. 487-500.
- Mitsch, W.J., Wise, K.M. (1998) Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetland treating acid mine drainage. *Water Research*, v.32, p. 1888-1900.
- Nguyen, H.T.H., Bui, A.T.K. (2017) *The removal of heavy metals by iron mine drainage sludge and Phragmites australis*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 71.
- Nguyen, H.T.H., Nguyen, B.Q., Duong, T.T., Bui, A.T.K., Nguyen, H.T.A., Cao, H.T., Mai, N.T., Nguyen, K.M., Pham, T.T., Kim, K.W. (2019) Pilot-Scale Removal of Arsenic and Heavy Metals from Mining Wastewater Using Adsorption Combined with Constructed Wetland. *Minerals*, v. 9(6), 379.
- Nyquist, J., Greger, M. (2009) A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage. *Ecological Engineering*, v. 35, p. 630–642.
- Reddy, K. R., DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. 1st Edition, CRC Press, 800 p.
- Rotta, L. H. S., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., Souza Filho, C. R. (2020) The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 90, p. 102-119.
- Saeed, T., Alam, M.K., Miah, M.J., Majed, N. (2021) Removal of heavy metals in subsurface flow constructed wetlands: Application of effluent recirculation. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 12, 100146.
- Sinicrope, T.L., Langis, R., Gersberg, R.M., Busnardo, M.J., Zedler, J.B. (1992) Metal removal by wetland mesocosms subjected to different hydroperiods. *Ecological Engineering*, v.1(4), p. 309-322.
- Stark, L.R., Brooks, R.P., Williams, F.M., Stevens Jr., S.E, Davis, L.K. (1994) Water quality during storm events from two constructed wetlands receiving mine drainage. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 30(4), p. 639-650.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, v. 45(1), p. 61-69.
- Wieder, R.K. (1989) A survey of constructed wetlands for acid coal mine drainage treatment in eastern United States. *Wetlands*, v. 9, p.299-315.
- Woulds, C., Ngwenya, B.T. (2004) Geochemical processes governing the performance of a constructed wetland treating acid mine drainage, Central Scotland. *Applied Geochemistry*, v. 19(11), p. 1773-1783.