

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Bruna Bastos Nascimento Henrique

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA NO CONTEXTO
DO FECHAMENTO DE MINA: POTENCIALIDADES, FRAGILIDADES E
OPORTUNIDADES DE MELHORIA**

Belo Horizonte
2024

Bruna Bastos Nascimento Henrique

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA NO
CONTEXTO DO FECHAMENTO DE MINA: POTENCIALIDADES, FRAGILIDADES
E OPORTUNIDADES DE MELHORIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, Prevenção e Controle da Poluição

Orientador: Prof. Eduardo Coutinho de Paula

Belo Horizonte
2024

H519a	<p>Henrique, Bruna Bastos Nascimento. Avaliação de métodos de tratamento de drenagem ácida no contexto do fechamento de mina [recurso eletrônico] : potencialidades, fragilidades e oportunidades de melhoria / Bruna Bastos Nascimento Henrique. – 2024. 1 recurso online (129 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Eduardo Coutinho de Paula.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 124-129.</p> <p>Bibliografia: f. 110-123. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Minas e mineração - Minas Gerais - Teses. 4. Drenagem ácida de minas - Teses. I. Paula, Eduardo Coutinho de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação de Métodos de Tratamento de Drenagem Ácida No Contexto do Fechamento de Mina: Potencialidades, Fragilidades e Oportunidades de Melhoria"

BRUNA BASTOS NASCIMENTO HENRIQUE

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Eduardo Coutinho de Paula - Orientador

Profa Lisete Celina Lange

Prof. José Augusto Martins Corrêa

Prof. Hernani Mota de Lima

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura
Coutinho de Paula

Prof. Eduardo

Coordenadora
Orientador



Documento assinado eletronicamente por **Lisete Celina Lange, Professora do Magistério Superior**, em 15/03/2024, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Professor do Magistério Superior**, em 15/03/2024, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Augusto Martins Corrêa, Usuário Externo**, em 02/04/2024, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, Usuário Externo**, em 03/04/2024, às 20:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3090036** e o código CRC **54E612EC**.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a UFMG, estendidos ao Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária e ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pelo apoio concedido para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a Deus, por mais uma vez amparar minha jornada e me proporcionar mais uma enorme conquista. Aos meus familiares Bastos, Andrade e Henrique, agradeço pelo apoio e incentivo de sempre. Ao meu marido Victor, agradeço por embarcar nessa jornada e por viver toda a intensidade do mestrado comigo, abdicando de finais de semana e de momentos juntos ao longo destes dois anos, para que eu pudesse concretizar e finalizar essa importante etapa da minha vida.

Ao meu orientador, professor Eduardo Coutinho, muito obrigada. Não posso deixar de agradecer por ter conduzido esse processo de maneira leve e extremamente colaborativa. Obrigada por ter sido parceiro e pela confiança na minha pesquisa e no meu potencial, mesmo quando as coisas não saíram conforme o esperado. Espero que possamos continuar trabalhando juntos.

À minha amiga, Lídia, obrigada por ter me incentivado a iniciar o mestrado, por me ajudar e encontrar um tema, por me empurrar para frente e por se alegrar com minhas conquistas. Aos meus colegas da Arcadis, obrigada pelo apoio e compreensão, e às minhas Gerente e Coordenadora, Luanna e Leila, por permitirem que minhas jornadas profissionais e acadêmicas caminhassem juntas. Agradeço à Sandrine, pela colaboração com a pesquisa.

Por fim, muito obrigada a todos os colegas que conheci durante o mestrado no SMARH. Agradecimento especial à Thayná, pela amizade que construímos, pela colaboração na pesquisa, e pela oportunidade de nos apoiarmos, nas conquistas e nas dificuldades.

Encerro essa etapa com o sentimento de dever cumprido, sabendo que dei o meu melhor, mesmo quando este foi o meu mínimo. Foi uma fase muito desafiadora na minha vida, mas com o auxílio de todos que aqui foram mencionados, conquisto o meu título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

RESUMO

A drenagem ácida de minas (DAM) é um dos principais passivos ambientais decorrentes das atividades de extração mineral, principalmente em minas abandonadas. Ao longo das décadas, métodos de tratamento foram desenvolvidos para mitigar a presença da DAM, sendo classificados em métodos passivos, ativos e biológicos. Alguns estudos anteriores abordaram estas tecnologias de tratamento; no entanto, pouco se discutiu sobre a manutenção da estabilidade química de um território a longo prazo. Esses problemas estão relacionados à falta de mecanismos aplicados pelos órgãos ambientais para regular a DAM, desde o licenciamento de uma mina, considerando a importância do aspecto preventivo, até o seu fechamento. O presente estudo incluiu, dentro de seus objetivos, identificar fragilidades, potencialidades e oportunidades de melhorias nas ações das mineradoras e do poder público na prevenção, controle e remediação da DAM no longo prazo. As etapas metodológicas estabelecidas foram a revisão sistemática de literatura, a extração de métricas dos estudos selecionados, a caracterização dos efluentes de DAM, o levantamento de tecnologias oferecidas pelo mercado e avaliação da DAM no contexto do Estado de Minas Gerais, do Brasil e do mundo. Identificou-se que alguns países como a Inglaterra, Canadá e Estados Unidos da América já adotam regulamentações específicas para a DAM, por meio de iniciativas que podem ser propagadas no Brasil e no Estado de Minas Gerais, auxiliando na atuação dos órgãos competentes na fiscalização e controle. Com base nos estudos prévios publicados, foi identificado que os métodos de tratamento passivo são os mais abordados, possuindo como vantagem o fato de requererem baixa manutenção. No entanto, há de se atentar para as suas desvantagens, tendo em vista que dificilmente um método passivo irá ser efetivo no tratamento de vários tipos de efluentes de DAM. Deve-se considerar a observação de que existe uma alta amplitude na concentração de elementos no efluente bruto, estando associada a fatores como clima, sazonalidade, tipo de minério explorado, dentre outros. Neste contexto, a utilização de *wetlands* construídos, em conjunto com outros sistemas passivos, tem se mostrado um método de tratamento que produz bons resultados, devendo essa escolha ser estudada em conjunto com os fatores externos já mencionados. Ainda quanto aos métodos de tratamento empregados nos estudos anteriores, foram obtidos resultados satisfatórios quanto aos dados de monitoramento dos efluentes tratados, que estiveram em conformidade com os respectivos padrões de lançamento de efluentes nacionais e internacionais, como critério de comparação e atendimento legal. Entretanto, muitos destes métodos ainda precisam ser melhorados. Em conclusão, as principais lacunas estão relacionadas à falta de ação dos órgãos e instituições ambientais responsáveis pela regulação das atividades minerárias em todas as fases do processo de desenvolvimento mineiro, desde o licenciamento até o encerramento da mina, incluindo o estabelecimento de normas reguladoras. Ainda, foi constatado que não há um caminho correto a ser seguido para a remediação da DAM, e muitas vezes a associação de vários métodos será demandado para esse fim. As recomendações apresentadas envolvem a adoção de medidas de prevenção e proteção para estruturas potencialmente geradoras de DAM, considerando os aspectos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Efluente de Mineração; Métodos de Tratamento; Estabilidade Química; Longo Prazo; Minas Gerais.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is one of the main environmental liabilities arising from mineral extraction activities, mainly in abandoned mines. Over the decades, treatment methods have been developed to mitigate the presence of AMD, being classified into passive, active and biological methods. Some previous studies have addressed these treatment technologies; however, little has been discussed about maintaining the long-term chemical stability of a territory. These problems are related to the lack of mechanisms applied by environmental agencies to regulate DAM, from the licensing of a mine, considering the importance of the preventive aspect, to its closure. The present study included, within its objectives, identifying weaknesses, potentialities and opportunities for improvements in the actions of mining companies and public authorities in the prevention, control and remediation of AMD in the long term. The methodological steps established were the systematic literature review, the extraction of metrics from selected studies, the characterization of DAM effluents, the survey of technologies offered by the market and evaluation of DAM in the context of the State of Minas Gerais, Brazil and the world. It was identified that some countries such as England, Canada and the United States of America already adopt specific regulations for DAM, through initiatives that can be propagated in Brazil and the State of Minas Gerais, assisting in the performance of competent bodies in monitoring and control. Based on previous published studies, it was identified that passive treatment methods are the most frequently used, with the advantage of requiring low maintenance. However, it is important to pay attention to its disadvantages, considering that it is unlikely that a passive method will be effective in treating various types of DAM effluents. It should be considered the observation that there is a high amplitude in the concentration of elements in the raw effluent, associated with factors such as climate, seasonality, type of ore explored, among others. In this context, the use of constructed wetlands, in conjunction with other passive systems, has proven to be a treatment method that produces good results, and this choice should be studied in conjunction with the external factors already mentioned. Still regarding the treatment methods used in previous studies, satisfactory results were obtained regarding the monitoring data of treated effluents, which were in compliance with the respective national and international effluent release standards, as a criterion for comparison and legal compliance. However, many of these methods still need to be improved. In conclusion, the main gaps are related to the lack of action by environmental bodies and institutions responsible for regulating mining activities in all phases of the mining development process, from licensing to mine closure, including the establishment of regulatory standards. Furthermore, it was found that there is no correct path to be followed for the remediation of DAM, and often the combination of several methods will be required for this purpose. The recommendations presented involve the adoption of prevention and protection measures for structures potentially generating DAM, considering sustainability aspects.

Keywords: Mining Effluent; Treatment Methods; Chemical Stability; Long Term; Minas Gerais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Métodos para Prevenção e Mitigação da DAM.	24
Figura 2: Fatores que Afetam na Oxidação de Sulfeto e na Drenagem de uma Mina.	27
Figura 3: Fluxograma de Tomada de Decisão para o Projeto do Sistema de Tratamento Passivo.	33
Figura 4: Quantificação de Estudos de Tratamento de DAM ao Longo do Tempo.	50
Figura 5: Quantificação de Estudos por tipo de Método de Tratamento de DAM ao Longo do Tempo.	51
Figura 6: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Alcalinidade na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	66
Figura 7: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Arsênio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	66
Figura 8: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Cálcio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	66
Figura 9: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Cádmio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	67
Figura 10: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Chumbo na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	67
Figura 11: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Cobalto na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	67
Figura 12: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Cobre na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	68
Figura 13: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Condutividade Elétrica na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	68
Figura 14: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Cromo na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	68
Figura 15: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Ferro na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	69
Figura 16: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Magnésio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	69

Figura 17: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Manganês na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	69
Figura 18: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Níquel na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	70
Figura 19: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de pH na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	70
Figura 20: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Potássio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	70
Figura 21: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Sódio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	71
Figura 22: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Sulfato na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	71
Figura 23: Gráfico <i>Box-plot</i> das Concentrações de Zinco na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compostos Utilizados na Neutralização da Drenagem Ácida de Mina.	29
Tabela 2 – Descrição do princípio de funcionamento dos principais métodos de tratamento ativo.	30
Tabela 3 – Características e Comparações entre os Métodos de Tratamento Biológicos Passivos e Ativos.	35
Tabela 4 – Tipos de Minérios e Número de Repetições nas Pesquisas Seleccionadas	52
Tabela 5 – Correlação entre as Tecnologias de Tratamentos de DAM Utilizadas para cada Tipo de Minério	53
Tabela 6 – Autores, Duração, Ano, Método e Escala de Aplicação de Métodos de Tratamento de DAM em longo prazo	54
Tabela 7 – Estudos Seleccionados para a Caracterização dos Efluentes de DAM.	60
Tabela 8 – Parâmetros Analisados nos Estudos Seleccionados.	62
Tabela 9 – Parâmetros Utilizados nos Estudos Seleccionados e Frequência de Ocorrência	63
Tabela 10 – Faixas de Variação, Média e Mediana dos Parâmetros Seleccionados na Entrada dos Sistemas de Tratamento	65
Tabela 11 – Faixas de Variação, Média e Mediana dos Parâmetros Seleccionados na Saída dos Sistemas de Tratamento	72
Tabela 12 – Padrões de Lançamento de Efluentes Nacionais e Internacionais	73
Tabela 13 – Informações das Empresas, Meios de Contato e Tratamentos Oferecidos	90
Tabela 14 – Inflação por País dos Estudos/Cotação dos Métodos de Tratamento de DAM	91
Tabela 15 – Tipo de Tratamento, Descrição, Valor Original, Total da Inflação e Valor Total do Tratamento por Estudo e para a Empresa C	92
Tabela 16 – Escala da Cotação Original e Valor Total Anual do Tratamento, por Estudo e para a Empresa C	92

Tabela 17 – Limites para Lançamentos de Efluentes de Acordo com a *Part 434, Subpart C - Acid or Ferruginous Mine Drainage*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

ANA – Agência Nacional das Águas

ANM – Agência Nacional de Mineração

BRS – Bactérias Redutoras de Sulfato

CEQGs – *Canadian Environmental Quality Guidelines*

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental

DAM – Drenagem Ácida de Mina

ESG – *Environmental, Social and Governance*

ETA – Estação de Tratamento de Água

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GERAC – Gerência de Áreas Contaminadas

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICMM – *International Council on Mining & Metals*

INAP - *The International Network for Acid Prevention*

MEND - *Mine Environment Neutral Drainage*

OMS – Organização Mundial de Saúde

OPEX – *Operational Expenditure*

P+L – Produção mais Limpa

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SSPA – Sistema Sucessivo de Produção de Alcalinidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	Revisão da Literatura	20
3.1	Estabilidade química	20
3.1.1	Potencial de lixiviação de metais e drenagem ácida	20
3.2	Drenagem Ácida de Mina	21
3.2.1	DAM e o ciclo de vida de uma mina	23
3.2.2	Processos físicos, químicos e biológicos que constituem a DAM	24
3.2.3	DAM em minas paralisadas ou abandonadas – passivo ambiental	27
3.3	Métodos de tratamento de DAM	28
3.3.1	Abordagem dos tratamentos da DAM em minas paralisadas ao longo do tempo 35	
3.4	Medidas de prevenção e controle da DAM na perspectiva da Produção mais Limpa (P+L)	38
3.5	Padrões de qualidade da água nas esferas estadual e federal e a nível internacional	40
4	JUSTIFICATIVA	41
5	METODOLOGIA	42
5.1	Revisão sistemática de literatura	42
5.2	Métricas dos estudos selecionados	45
5.3	Caracterização dos efluentes de DAM	46
5.4	Levantamento de tecnologias oferecidas pelo mercado	47
5.5	DAM no contexto do Estado de Minas Gerais, do Brasil e do mundo	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6.1	Métricas dos estudos selecionados	50
6.2	Caracterização dos efluentes de DAM e comparação com as legislações	60
6.3	Análise das tecnologias ofertadas pelo mercado	90
6.4	Normas e regulações em relação à DAM em Minas Gerais, no Brasil e no Mundo em vistas ao fechamento de mina	95
6.5	Potencialidades, fragilidades e oportunidades de melhoria	100
7	CONCLUSÕES	103
8	RECOMENDAÇÕES	106
9	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – Tabela de Revisão de Literatura	122

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um setor que está incluso na base da economia do Brasil, fornecendo matéria-prima para as mais diversas indústrias e permitindo que vários produtos, de baixa ou alta complexidade, tenham origem mineral. A atividade de exploração mineral tem uma atuação relevante frente a fatores como o desenvolvimento socioeconômico trazendo, no entanto, diversos impactos socioambientais adversos. O legado considerado positivo das atividades de mineração pode estar relacionado aos benefícios econômicos para uma certa região, enquanto os impactos adversos, de acordo com Brueckner *et al.* (2021), podem ocorrer nas mais diversas áreas, podendo ser citada a influência na saúde humana, quando da exposição de uma população a substâncias químicas. Além disso, fatores como a realocação de comunidades e a instabilidade ocasionada aos meios de subsistência também são situações adversas ocasionadas a uma região, ou a uma comunidade, em função da exploração mineral.

Concomitantemente, os impactos da mineração podem atingir grandes proporções, conforme relata Vieira (2011), em função da sua capacidade de modificar o ambiente em que se insere e da larga escala espacial utilizada para a implantação de ativos, incluindo estruturas e equipamentos operacionais, portanto alterando o equilíbrio de biomas e ecossistemas. Um questionamento que pode ser levantando neste aspecto é em relação à viabilidade de se operar e encerrar uma indústria da mineração de maneira sustentável, minimizando impactos sociais e ambientais adversos. Associadamente, todo o passivo ambiental da mineração fica como herança para as atuais e futuras gerações.

Neste contexto, sabe-se que as atividades da mineração indicam alto potencial de poluição de cursos d'água. Tais impactos podem estar associados a, pelo menos, três níveis, sendo a alta demanda por água em todo o processo, principalmente no caso de existência de minerodutos; a possibilidade de rebaixamento de lençol freático, decorrente da exploração mineral, que pode vir a afetar a recarga de aquíferos; e o risco de contaminação dos corpos d'água em diversas etapas da atividade minerária (MILANEZ, 2017).

Ainda quanto à possibilidade de contaminação das águas, a indústria da mineração oferece o potencial de lixiviação de metais e de drenagem ácida de mina (DAM),

proveniente de estruturas como, sem se limitar a, pilhas de estéril e barragens de rejeito.

Há de se ressaltar a diferença entre os termos contaminação e poluição mencionados anteriormente. O conceito de contaminação está voltado para a presença de algum elemento, como os metais, em concentrações excessivas àquelas naturalmente encontradas em um corpo ou curso d'água. Já a poluição é caracterizada uma vez que a contaminação presente passa a ocasionar danos à vida humana ou aquática, causando desequilíbrio em organismos ou ecossistemas (LOURENÇO; CASTRO, 2019).

Quando avaliados os componentes que representam algum potencial de poluição e/ou contaminação de cursos d'água atrelados às atividades de mineração, considerando-se longo prazo, é necessário que sejam aplicadas medidas e planos de ação que procurem prevenir e/ou minimizar os impactos decorrentes da extração mineral em um determinado território.

O caráter de prevenção deve, sempre que possível, ser abordado ainda na fase de estudos de impactos ambientais prévios ao licenciamento de uma mina. De acordo com Ishiaki e Yoshida (2020), o licenciamento ambiental é uma ferramenta de extrema importância na gestão do meio ambiente, principalmente em empreendimentos minerários. Ainda segundo os autores, a falha no emprego e efetivação do licenciamento ambiental de uma atividade minerária pode ocasionar no aumento de impactos negativos no meio socioambiental. Estes impactos podem estar associados à contaminação do ar e das águas e à redução da biodiversidade de uma região, além da possibilidade de alterar o uso e ocupação do solo em uma região.

Em vistas ao avanço das operações de uma mina, os impactos negativos previamente estudados e a implementação de ações de prevenção e de recuperação precisam ser registrados e acompanhados. Neste sentido, a elaboração de um Plano de Fechamento de Mina em um dado empreendimento visa este objetivo. Segundo o Guia para Planejamento do Fechamento de Mina, do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2013), o fechamento de uma mina é entendido como o momento após o fim das atividades de produção que irá consolidar o encerramento das etapas de fechamento, desativação ou descomissionamento, que se conclui com a remoção das

instalações (ativos) provisórias que compunham a mina como um todo (SÁNCHEZ; SILVA-SÁNCHEZ; NERI, 2013).

O Plano de Fechamento de Mina (PFM) é o documento que traz uma compilação das informações mais importantes, bem como as diretrizes a serem seguidas para que o empreendimento possa consolidar e implementar as ações de fechamento (SÁNCHEZ; SILVA-SÁNCHEZ; NERI, 2013). O PFM deve conter informações de meio físico, biótico e socioeconômico, bem como as medidas para que todos esses aspectos estejam em condições satisfatórias ao fim da vida útil da mina. Além disso, existem alguns princípios básicos que são exigidos para que o processo de fechamento seja concluído legalmente, a exemplo da promoção da estabilidade física e química da área, que são conceitos de fechamento universalmente aceitos (ICMM, 2019).

Diante do exposto, e considerando a ligação direta existente entre a possível geração de DAM, no contexto da estabilização química da área no pós-fechamento de uma mina, algumas medidas podem ser aplicadas para inibir a formação da DAM. Segundo Johnson e Hallberg (2005), estas medidas são conhecidas como “controle de migração”, e são divididas entre tratamentos ativos e passivos. Os processos ativos funcionam a partir da neutralização e precipitação de metais pela aplicação de produtos alcalinos, enquanto os processos passivos criam ambientes de alagamento construídos em larga escala, a partir de materiais naturais.

Ainda, há os tratamentos biológicos, que, de acordo com Barros *et al.* (2012), obtêm vantagem em função dos demais tipos de tratamento, pois apresentam bom custo-benefício. Sua viabilidade consta na oxidação da matéria orgânica por bactérias redutoras de sulfato (BRS) (YABUKI *et al.*, 2020), sendo essa uma das possibilidades de utilização do tratamento biológico.

Considerando a ampla gama de rotas com potencial de serem exploradas dentro dos tipos de métodos mencionados para o tratamento de DAM, algumas problemáticas que estão diretamente envolvidas com a presença de DAM em uma área podem ser identificadas. A primeira delas relaciona-se ao fato de que, conforme explorado por Matsumoto, Shimada e Sasaoka (2016), a principal fonte de contaminação proveniente da DAM é correlacionada às minas abandonadas. Ainda nessa discussão,

foi identificado que algumas minas de carvão abandonadas durante a crise econômica dos anos 1900 nos Estados Unidos da América ainda indicavam geração de DAM à época em que o artigo foi elaborado. Tais informações corroboram com a ideia de que a geração de passivos ambientais, envolvendo instabilidade química, podem perdurar por décadas ou até mesmo séculos.

A segunda problemática relaciona-se com a primeira, considerando-se a dificuldade que órgãos ambientais e agências reguladoras podem vir a enfrentar na fiscalização e controle da geração de DAM nos empreendimentos minerários. Nesse mesmo contexto, é importante que o fechamento de mina seja executado da maneira correta, visando evitar que a DAM enquanto passivo ambiental se torne irremediável ao passar um longo período sem tratamento.

Assim sendo, a união dos fatores institucionais, políticos e técnicos, como o tipo de tratamento de DAM, o período temporal de aplicação das tecnologias para tratamento, fechamento de mina e participação do poder público e o investimento técnico-financeiro das empresas de mineração podem influenciar na obtenção da estabilidade química de uma área de mineração em longo prazo. Até a época de elaboração do presente trabalho, não foram identificados estudos voltados para essas temáticas em conjunto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar comparativamente técnicas de tratamento de efluentes de minas com drenagem ácida, no contexto de fechamento de mina e da estabilização química pós-fechamento, identificando potencialidades e fragilidades.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever e avaliar a partir de revisão sistemática as características dos efluentes de drenagem de mina;
- Apresentar criticamente as técnicas de tratamento para drenagem ácida de mina e as soluções oferecidas pelo mercado, com seus respectivos custos;

- Compilar informações no cenário estadual de Minas Gerais a respeito de minas abandonadas e/ou paralisadas no entendimento de como o Estado se posiciona frente à DAM como passivo ambiental;
- Identificar fragilidades e dificuldades da atuação governamental nos quesitos estabilidade química e DAM e propor potenciais soluções baseando-se no cenário do Estado de Minas Gerais.

3 Revisão da Literatura

3.1 Estabilidade química

A definição de estabilidade química, de acordo com o *Internacional Council on Mining & Metals* - ICMM (2019) é a prevenção de efeitos adversos em função da qualidade ambiental, proveniente de uma contaminação química após o encerramento das atividades minerárias. Segundo Sánchez, Silva-Sánchez e Neri (2013), o potencial de geração de DAM afeta a estabilidade química de uma área, e medidas de gestão de recursos hídricos são necessárias para que a estabilidade química possa ser restaurada.

3.1.1 Potencial de lixiviação de metais e drenagem ácida

Conforme a segunda edição da Norma Técnica nº 10005, de 31 de maio de 2004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata sobre os procedimentos para a obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos, a definição de lixiviação é o processo que determina a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes em um resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

De maneira geral, quando um elemento metálico está disponível em altas concentrações, sua lixiviação será favorecida. No caso de metais traço transferidos do resíduo para as águas subterrâneas e superficiais, a lixiviação poderá ser influenciada pelo pH e pelas características e propriedades do solo, pela quantidade e a natureza da matéria orgânica, e pelo potencial de oxirredução (Eh) (CAMPOS, 2010).

Segundo Akabzaa e Yidana (2012), a DAM caracteriza os principais riscos associados à gestão ambiental na indústria minerária, sendo que tais fatores constituem uma problemática associada à poluição de águas superficiais e subterrâneas, com impactos adversos para longos períodos de tempos. Diante disso, é de extrema importância que sejam conhecidas as características geoquímicas do local, além da qualidade dos efluentes de drenagem da mina, para que se possa avaliar quais processos químicos ocorrem quando do contato da rocha/estéril com o efluente.

Matsumoto, Shimada e Sasaoka (2016) associam a ocorrência de DAM ao abandono de minas no passado, bem como a falhas na gestão/tratamento da drenagem da mina

de maneira geral, e que, em ambos os casos, tem-se a percolação de água de chuva através de estruturas com minerais expostos também à oxidação. Dold (2017) discute que a acidificação da água é resultado da oxidação de rochas ricas em sulfetos em sua composição.

Na perspectiva do fechamento de mina, novamente, é necessário que as atividades de recuperação ambiental, seguidas de uma etapa de monitoramento e manutenção, garantam plena estabilidade química da área. Para que isso seja atingido, espera-se que as etapas de diagnóstico de potencial de lixiviação de metais e/ou drenagem ácida sejam realizadas progressivamente ao longo da vida útil da mina, bem como o tratamento, seja ativo ou passivo, com o propósito de minimizar os custos e modelar o comportamento dos metais alvo em longo prazo, considerando que, eventualmente, o monitoramento será descontinuado. Não foram encontradas na literatura evidências que trazem recomendações exatas quanto ao tempo de monitoramento a ser seguido.

3.2 Drenagem Ácida de Mina

O potencial de geração de drenagem ácida é possivelmente existente desde que as atividades de mineração foram iniciadas, e o primeiro registro de impactos ambientais provenientes da DAM provavelmente ocorreu em 1556 (STEFFEN ROBERTSON AND KRISTEN (B.C) Inc., 1989). O Guia Global de Drenagem Ácida de Rochas (*Global Acid Rock Drainage Guide*), da Rede internacional para a Prevenção de Ácidos (*The International Network for Acid Prevention - INAP*) menciona que para compreensão dos aspectos e questões-chaves que envolvem a DAM é necessário um conhecimento multidisciplinar. Ainda segundo o referido guia, o tipo de drenagem gerada resultará das condições geológicas e mineralógicas do minério e da rocha hospedeira, e que as características climáticas e hidrogeológicas/hidrológicas atuam na definição dos caminhos a serem seguidos pelos principais elementos constituintes da drenagem em questão.

A mineração de rochas com a presença de sulfetos, tais quais ouro, cobre, níquel, carvão, chumbo, zinco e prata, está fortemente correlacionada com a geração de drenagem ácida, que ocorre mediante a exposição do material retirado do interior da terra à água e ao oxigênio atmosféricos. Este processo ocorre naturalmente no ambiente, mas a mineração é um agente intensificador, visto que aumenta a

quantidade de sulfeto presente no meio (AKCIL; KOLDAS, 2004; ANA e IBRAM, 2006; MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014).

Algumas bactérias (bactérias acidófilas – principalmente a *Thiobacillus ferrooxidans*), presentes de modo natural no ambiente, podem acelerar na geração de DAM a partir da quebra dos minerais sulfetados. Os produtos ácidos provenientes da DAM podem promover a solubilização de elementos químicos presentes em solos e rochas, como manganês, cromo, cádmio, zinco, chumbo e arsênio, em seu percurso superficial e subterrâneo, resultando em altas concentrações destes elementos em forma iônica. Os minérios que indicam maior potencial de geração de DAM são aqueles que possuem grandes quantidades de pirita (FeS_2) ou pirrotita ($\text{Fe}(1-x)\text{S}$), associadas à baixa presença de minerais neutralizadores, como dolomita e algumas espécies de silicatos (AKCIL; KOLDAS, 2004; ANA e IBRAM, 2006; MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014).

De acordo com o Documento Técnico da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (*U.S Environmental Protection Agency – EPA, 1994*), de modo geral, na mineração, os principais fatores que estão potencialmente associados à geração de DAM são o minério extraído, quando utilizado em operações que envolvem lixiviação cianetada ou sulfetada, por exemplo, além das pilhas de rejeito e estéril. As paredes de cavas a céu aberto e as galerias de minas subterrâneas, bem como o tamponamento destas galerias com material estéril também se enquadram como superfícies potencialmente favorecedoras da geração de DAM.

Barragens de rejeitos apresentam alto risco de desenvolvimento da DAM, pois possuem, em maioria, mineralogia e textura mais uniformes do rejeito (menor granulometria) em relação às pilhas de estéril. Diante disso, a difusão do oxigênio ocorre de maneira mais lenta, o que, de certa forma, causa um efeito inibidor ao ácido. No entanto, em função da posição topográfica normalmente encontrada para a disposição de rejeitos (vales ou represas elevadas), é possível que o efluente permaneça saturado apenas ao longo da operação da mina, visto que, após o fechamento, a superfície de água livre na barragem poderá ser substancialmente reduzida, favorecendo a geração de DAM (EPA, 1994).

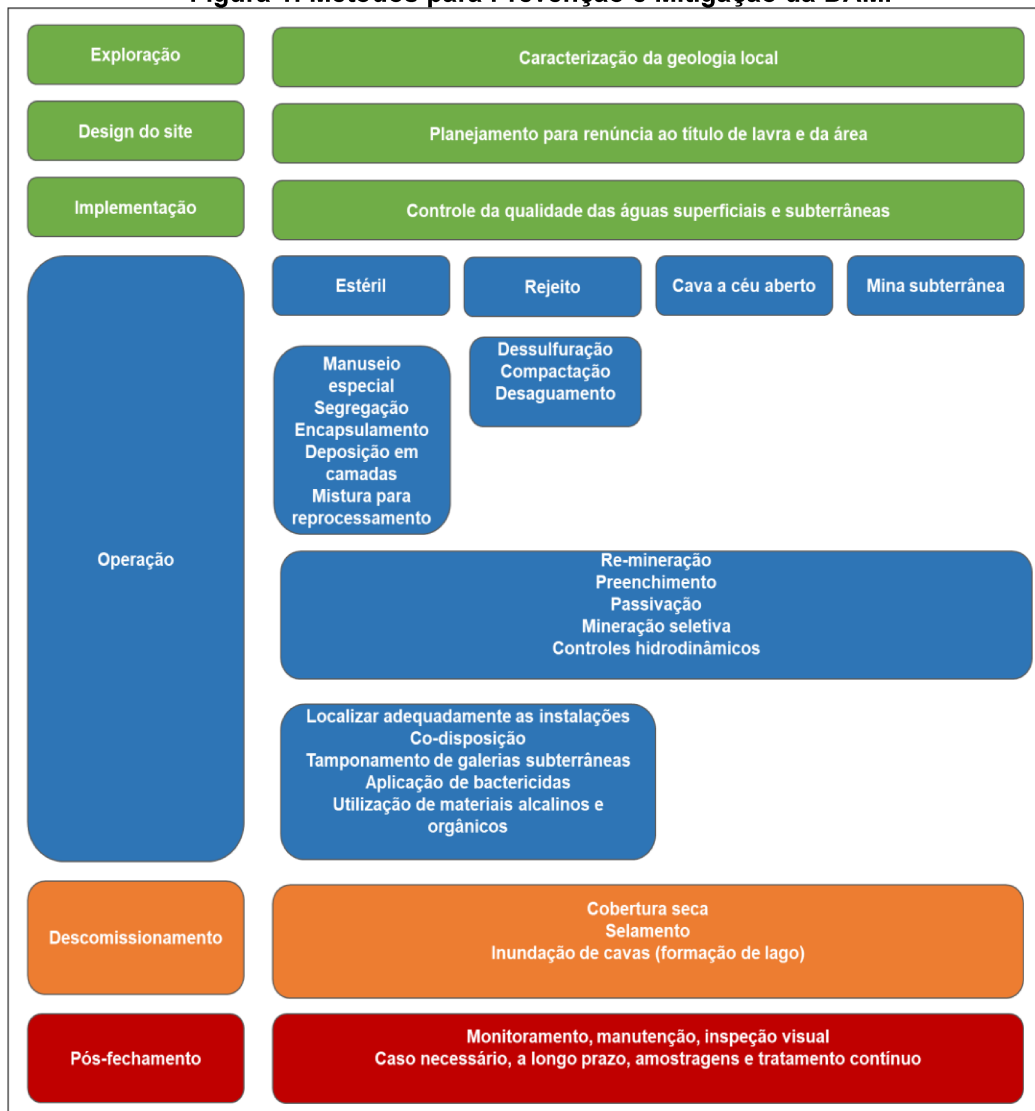
Um dos principais desafios que envolvem a gestão da DAM é o controle da geração da drenagem, visto que, caso não sejam aplicadas técnicas adequadas, a geração continuará ocorrendo, até que um ou mais reagentes diretamente envolvidos nos processos de oxidação (minerais, água, oxigênio), estejam indisponíveis naquele meio, situação que poderá perdurar durante décadas ou até mesmo séculos após o fim das atividades de mineração (INAP, 2014).

3.2.1 DAM e o ciclo de vida de uma mina

O ciclo de vida de uma mina engloba as etapas do estudo de viabilidade até o pós-fechamento, ou seja, “do berço ao berço”. Neste contexto, é de extrema importância que cada uma dessas fases considere a avaliação do risco de geração de drenagem ácida de mina, a fim de identificar e, na mesma proporção, evitar e/ou mitigar possíveis impactos advindos do processo de mineração, do seu início ao seu respectivo fim (MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014).

Cada fase do ciclo de vida de uma mina oferece diferentes visões e medidas de identificação, prevenção e mitigação da DAM, conforme ilustra o fluxograma da Figura 1.

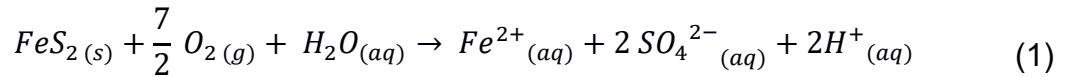
Figura 1: Métodos para Prevenção e Mitigação da DAM.



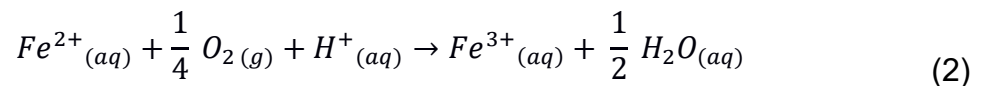
Fonte: Adaptado de INAP, 2014.

3.2.2 Processos físicos, químicos e biológicos que constituem a DAM

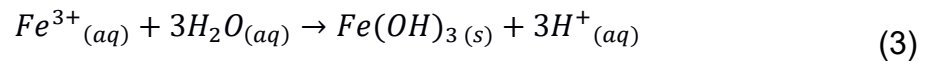
Bem como explicitado anteriormente, a DAM dá-se a partir da oxidação da pirita (FeS_2) e se caracteriza por efluentes com pH baixo, alta condutividade elétrica, altas concentrações de ferro, alumínio e manganês, e baixas concentrações de metais-traço tóxicos. As reações de oxidação da pirita iniciam-se com a oxidação do bissulfeto de ferro (pirita) em ferro dissolvido, sulfato e hidrogênio (equação (1)) (AKCIL; KOLDAS, 2004; MURRAY *et al.*, 2021; MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014):



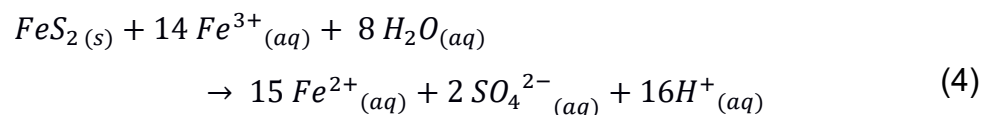
A presença dos elementos Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ em forma iônica, ou seja, dissolvidos no meio, ocasiona aumento da presença de sólidos dissolvidos totais na água, e, por consequência, da sua acidez. A depender das condições do meio (oxigênio dissolvido, pH e intensidade da atividade bacteriana na região), grande parte do Fe^{2+} será oxidado em Fe^{3+} . Quando este processo ocorre em pH baixo, o ferro é catalisado por microrganismos presentes, que consomem a energia liberada por meio da reação de oxidação do íon ferroso. O processo descrito é expresso pela equação (2):



Em condições de pH ácido (variando entre 2,3 e 3,5), o ferro orgânico precipita (por meio de hidrólise) como hidróxido de ferro, tornando o meio ainda mais ácido, conforme equação (3):



Para o cenário da Equação 3, em valores de pH próximos ou inferiores a 2,3, a hidrólise anteriormente mencionada praticamente não ocorre, aumentando a concentração de Fe^{3+} no meio, que irá oxidar a pirita. Ou seja, qualquer Fe^{3+} produzido, conforme indicado na Equação 2 que não for precipitado, conforme a Equação 3, poderá ser utilizado para oxidação da pirita sobressalente no meio (equação (4)):

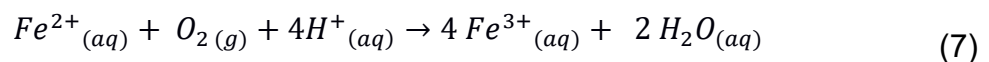
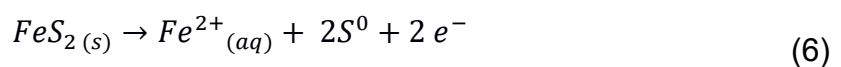
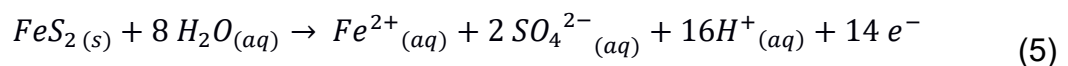


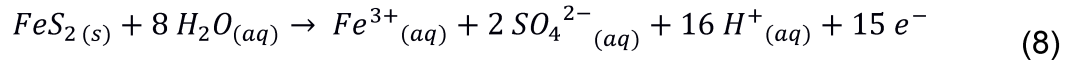
As bactérias acidófilas possuem o potencial de estabelecer microrganismos que podem acelerar as reações químicas que envolvem os processos de oxidação do ferro ferroso, conforme equações esboçadas acima. A ação desse tipo de microrganismo pode ser denominada biolixiviação, e as principais bactérias que atuam neste

processo são *Thiobacillus ferrooxidans*; *Thiobacillus thiooxidans*, *Lepstospirillum ferrooxidans*, *Sulfolobus acidocaldarius*, *Acidianus* e *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Além destes, há registros para efluentes ácidos de minas de algumas espécies como algas verdes, bactérias heterotróficas, germes, ameba, microplasma e fungos. Durante a atividade microbiana como agentes catalisadores das reações, há liberação de calor e as reações ocorrem em baixas pressão e temperatura. No entanto, há dúvidas se a atuação destas bactérias neste processo ocorre de maneira direta, por meio do contato físico entre estas e as partículas de sulfeto, ou de maneira indireta, a partir do contato entre produtos intermediários ou finais do metabolismo microbiano com o mineral (GÓMEZ *et al.*, 1990 DOLD *et al.*, 1999 *apud* MARTINS *et al.*, 2004; SOUZA, 2015).

Estudos da década de 1990 revelam que há relação direta entre a lixiviação de metais e a presença de bactérias no ambiente, uma vez que em minas de urânio, localizadas em Ontário, no Canadá, foi constatado que em ambientes com águas de teor ácido, com grandes quantidades de urânio e ferro, havia presença de bactérias do gênero *Thiobacillus*. Observou-se, ainda, que na ausência de tais bactérias, o urânio não estava sendo lixiviado (GÓMEZ *et al.*, 1990 *apud* MARTINS *et al.*, 2004).

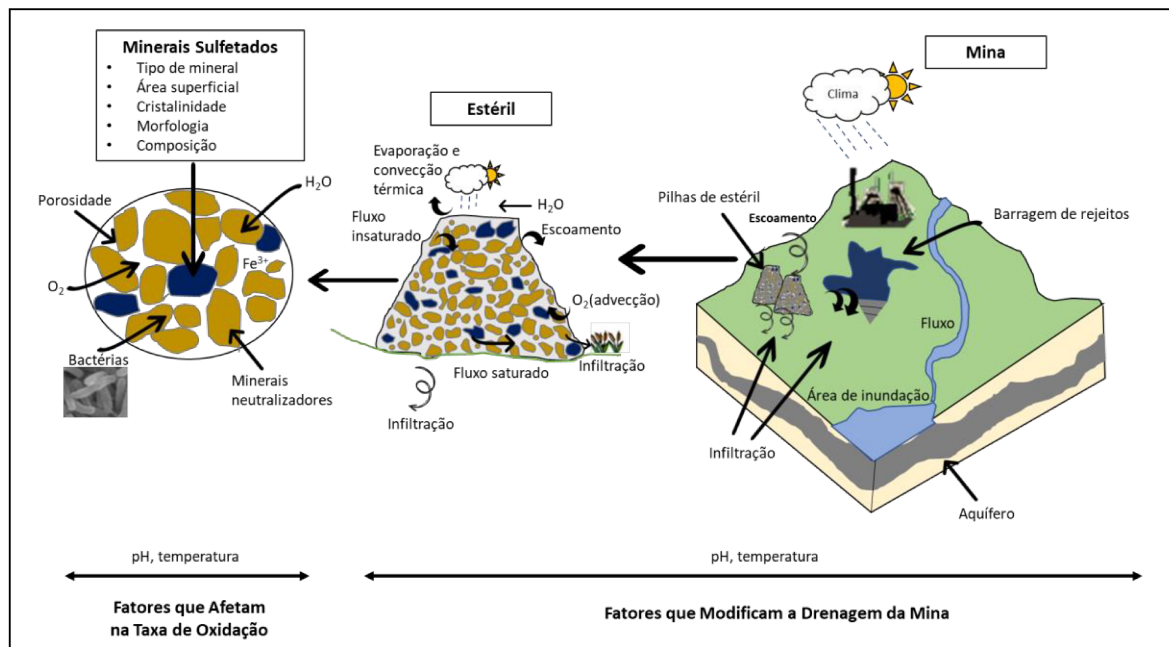
As equações anteriormente apresentadas sugerem que o processo de geração de DAM ocorre considerando que o agente oxidante é o oxigênio, e que o metal oxidado é o ferro III (férico), principal oxidante da pirita, que será reduzida a ferro II (ferroso), ocasionando em um processo contínuo de produção de acidez. No entanto, há também a possibilidade de oxidação de pirita na ausência de oxigênio dissolvido, a partir de dois meios que poderão produzir S^0 (enxofre molecular) ou SO_4^{2-} (íon sulfato), a depender do potencial eletroquímico. As equações (5) a (8) expressam as semirreações de oxidação da pirita a partir do processo eletroquímico (MELLO; DUARTE; LADEIRA, 2014):





As consequências da DAM podem variar entre moderada a grave, principalmente quando associadas ao pH e a acidez. Considera-se que em taxas de pH entre 2 e 4, e com acidez variando entre 1.000 e 100.000 mg/L, os danos ambientais podem ser considerados, no mínimo, como moderados (AKCIL; KOLDAS, 2004). Alguns fatores externos (físicos, químicos e biológicos) são capazes de interferir na produção de acidez e na oxidação do sulfeto. Estes agentes podem ser visualizados esquematicamente na Figura 2:

Figura 2: Fatores que Afetam na Oxidação de Sulfeto e na Drenagem de uma Mina.



Fonte: Adaptado de INAP, 2014.

3.2.3 DAM em minas paralisadas ou abandonadas – passivo ambiental

Sabe-se que a DAM ao final do ciclo de vida de uma mina, ou até mesmo quando da paralisação das atividades minerárias, com respectiva geração de passivos ambientais, não é um problema encontrado isoladamente no Brasil. Um estudo realizado por Gemici (2007), que investigou a mobilidade de metais em resíduos e sedimentos de córregos presentes na proximidades de uma mina de mercúrio abandonada na cidade de Alaşehir, na Turquia, revelou que as águas da mina

indicavam caráter ácido, com pH variando entre 2,55 (períodos secos) e 2,70 (períodos chuvosos). Foi dissertado na pesquisa que a principal influência para a geração de acidez nas águas avaliadas é a oxidação de minerais sulfetados, como a pirita, notadamente presente na área da mina abandonada em estudo.

Moraes, Silva e Lima (2010), traz à tona relatos de drenagem ácida em uma mina de Pirita, localizada entre os municípios de Mariana e Ouro Preto, na região central do Estado de Minas Gerais, Brasil, que foi lavrada no período entre a Era Vargas (1930 a 1945) e o início da década de 1960, e produto produzido era ácido sulfúrico, utilizado majoritariamente para fins bélicos. Segundo os autores, a mina encontra-se desativada, possuindo a instabilidade química como um dos principais passivos ambientais resultantes das atividades minerárias anteriormente executadas.

Um estudo de modelagem de transporte reativo, realizado por Tabelin *et al.* (2019), objetivava obter a previsão da formação de DAM a partir da migração de metais tóxicos. O estudo foi conduzido em uma barragem de rejeitos de uma mina fechada, localizada em Hokkaido, no Japão, que possui tratamento para neutralização desde 1970. As conclusões da pesquisa revelaram que a DAM e a liberação de metais-traço poderiam persistir no local mesmo após mais de 40 anos de exposição, em função da presença de pirita e metais-traço em quantidades relevantes no rejeito disposto na barragem.

Há indícios de efeitos negativos em função da ocorrência de DAM também em regiões com presença de minas de carvão abandonadas na Espanha, resultando na poluição das águas do rio Tinto. Nos Estados Unidos da América, o cenário é parecido, uma vez que a DAM resultante de um elevado número de minas de carvão abandonadas ocasionou na poluição de rios, atingindo uma extensão de aproximadamente 23.000 km. Na China, a presença de DAM proveniente de inúmeras minas abandonadas, trouxe uma série de problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos, como a deterioração da qualidade da água (WANG *et al.*, 2021).

3.3 Métodos de tratamento de DAM

Métodos de tratamento ativo

As tecnologias abióticas de tratamento de DAM foram definidas por Johnson e Hallberg (2005) em duas classes: tecnologias ativas e passivas. A primeira, segundo os autores, envolve a adição de material alcalino ao efluente ácido, a fim de se aumentar o seu pH, aumentar a taxa de oxidação química e, por fim, precipitar os metais presentes como hidróxidos e carbonatos. Os materiais mais comumente utilizados na neutralização de pH são cal, calcário, soda cáustica e carbonato de sódio (BROWN; BARLEY; WOOD, 2002). Evidentemente, cada um destes componentes possui vantagens e desvantagens em sua utilização, as quais estão descritas na Tabela 1:

Tabela 1 – Compostos Utilizados na Neutralização da Drenagem Ácida de Mina.

Nome do composto	Fórmula química/ingrediente ativo	Comentários
Óxido de cálcio (cal viva, cal cáustica)	CaO	Muito reativo
Carbonato de cálcio (calcário)	CaCO ₃	Utilizado com maior sucesso em situações anaeróbias
Carbonato de cálcio e magnésio (dolomita)	CaMg(CO ₃) ₂	Similar ao calcário, menos reativo
Hidróxido de cálcio (cal hidratada)	Ca(OH) ₂	Requer mistura extensiva
Hidróxido de sódio (soda cáustica)	NaOH	Altamente solúvel, disponível de forma sólida ou em solução
Carbonato de sódio	Na ₂ CO ₃	Usualmente encontrado em formato "briquete", utilizado em locais remotos
Hidróxido de potássio	KOH	Similar ao hidróxido de sódio
Óxido de magnésio	MgO	Similar ao óxido de cálcio
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	Similar ao hidróxido de cálcio
Amônia	NH ₃ ou NH ₄ OH	Reativo e solúvel, pode ser fornecido em amônia aquosa
Peróxido de cálcio	CaO ₂	Neutralizador e oxidante, fornecido em pó ou em "briquete"
Pó de forno (<i>kiln dust</i>)	CaO.Ca(OH) ₂	Produto residual da indústria de cimento, contém cal
Resíduos de carvão	CaO.CaCO ₃	Muitos resíduos de carvão possuem cal ou carbonato, e seu potencial de neutralização varia a partir das fontes

Fonte: Adaptado de Skousen *et al.*, 1996 *apud* Brown; Barley e Wood, 2002.

RoyChowdhury, Sakar e Datta (2015), descreveram que as vantagens de se utilizar as tecnologias de tratamento ativas envolvem o fato de que elas não requerem espaço ou necessidade de construções adicionais. Este processo também apresenta rapidez na remoção da acidez e dos metais, além de indicar menor custo associado ao

manuseio e disposição de lodo, o que é um problema frequente dos métodos de tratamento passivos.

Além do que já foi mencionado, os tratamentos ativos são, geralmente, mais caros, principalmente quando da implementação em minas que já não estão mais em operação. Assim sendo, a utilização de métodos ativos é recomendada quando a DAM ocorre em minas ainda em operação, uma vez que os custos de implantação e operação do tratamento podem ser compensados e inseridos em valores operacionais, e não de fechamento (JALLATH *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2019).

Os métodos de tratamento ativo mais comuns encontrados na literatura envolvem as tecnologias baseadas em membranas de osmose inversa ou nanofiltração, que geram águas com qualidade adequada para descarga no meio ambiente, além dos processos eletroquímicos, que, no entanto, são processos caros em termos de custo e energia. Outras tecnologias são mencionadas, como a troca iônica e a eletrocoagulação, além uso de rejeitos de outras indústrias (água residuária, escória de aço, cinzas de indústria de cimento) (VIADERO JR *et al.*, 2020; MULOPOO, 2022). Uma breve descrição do princípio de funcionamento dos processos mencionados está disposta na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição do princípio de funcionamento dos principais métodos de tratamento ativo.

Método	Descrição
Membranas de osmose inversa	Técnica de purificação de água e remoção de íons, na qual um solvente sofre uma pressão, que a obriga a passar através de uma membrana porosa, em um fluxo inverso ao da osmose convencional. Amplamente utilizada na dessalinização da água.
Membranas de ultrafiltração	Técnica de filtração cuja pressão hidrostática força a passagem de um líquido através de uma membrana semipermeável. Aplicável para efluentes compostos por partículas com granulometria superior a 10-20 nanômetros.
Processos eletroquímicos	Utilização de processos como eletrólise, eletrodialise e eletrodeionização para a recuperação de metais traço no tratamento de águas residuárias ricas nestes elementos.
Troca iônica	Método de tratamento de águas residuárias ricas em íons, a partir do contato do efluente com resinas compostas por elementos como Ca^{2+} e Mg^{2+} . A afinidade entre os íons do efluente e os compostos da resina permite que os metais e sais componentes presentes no efluente sejam removidos. Aplicação típica no abrandamento da água.
Eletrocoagulação	Processo que utiliza correntes elétricas para gerar coagulantes por oxidação eletrolítica, como precipitados de hidróxido. Estes coagulantes gerados irão auxiliar na remoção dos íons presentes na água.

Fonte: Peng *et al.* (2014), Karimifard e Moghaddam, 2018, Adeola *et al.* (2019), Musthafa *et al.* (2019), Zhang *et al.* (2019)

Métodos de tratamento passivo

As tecnologias de tratamento passivo, segundo Johnson e Hallberg (2005), também indicam a finalidade de adicionar alcalinidade ao efluente, a partir do uso de calcário, mantendo o ferro em sua forma reduzida, evitando, assim, a oxidação do ferro e a precipitação do hidróxido férrico. Estes sistemas são mais econômicos, requerem pouca manutenção e tem baixo custo. As aplicações dos métodos de tratamento passivo podem ser consideradas economicamente atraentes em condições de baixas cargas de ácido, não sendo adequados em concentrações superiores a 150 kg de CaCO_3 por dia (JALLATH *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2019; IGHALO *et al.*, 2022).

Ao longo do tempo, muitos métodos de tratamento passivo foram desenvolvidos, buscando atingir uma maior eficiência na remoção da acidez e de metais. A tecnologia mais difundida, conforme descrevem Johnson e Hallberg (2005) e RoyChowdhury *et al.* (2015), é a aplicação de drenos anóxicos de calcário, construídos em meio subterrâneo, e seu princípio de funcionamento se dá por meio do aumento a pressão parcial de dióxido de carbono dentro do dreno, aumentando a alcalinidade do efluente. Assim sendo, em função da condição anóxica, o ferro permanece em sua forma reduzida, impedindo a precipitação de hidróxido de ferro.

Na literatura são encontradas inúmeras outras tecnologias para remediação de DAM com princípio de atuação passivo. Dentro deste contexto, podem ser mencionadas as zonas úmidas construídas (*wetlands* construídos) aeróbicas ou anaeróbicas, barreiras reativas permeáveis e leitos de lixiviação de escória (BROWN; BARLEY; WOOD, 2002; ROYCHOWDURY *et al.*, 2015). *Wetlands* construídos ou zonas úmidas alagadas são ambientes que apresentam interface entre os ecossistemas aquático e terrestre, podendo ser de origem natural ou artificial. Uma das principais características de zonas alagadas é a presença de espécies de fauna e flora que são capazes de se adaptar às condições diversas que este tipo de ambiente oferece (SALDANHA; COSTA, 2019).

De acordo com Chen *et al.* (2016) barreiras reativas permeáveis compõem uma tecnologia direcionada ao tratamento *in-situ* de águas contaminadas, sendo formadas por uma camada de material reativo em uma camada subterrânea, que irá reagir com os elementos disponíveis no efluente a ser tratado. As barreiras reativas permeáveis

podem funcionar a partir de processos como adsorção, precipitação, degradação e oxirredução.

Por sua vez, os leitos de lixiviação de escória são estruturas que utilizam escória de aciaria para criar uma zona drenante na qual a água irá percolar o leito construído, de forma que o líquido receberá cargas de alcalinidade, neutralizando, portanto, a acidez do efluente de DAM. Esse tipo de sistema pode ser desvantajoso em vista à possibilidade de esgotamento da alcalinidade presente na escória, ou até mesmo quando este insumo não for utilizado em quantidades adequadas (ARAÚJO, 2020).

Os métodos de tratamento passivos geralmente apresentam a necessidade de grandes áreas para sua implantação, além da geração de subprodutos, como o lodo, que necessita de disposição correta. Algumas pesquisas foram direcionadas à recuperação de material proveniente do lodo. Peterson, Cardoso e Pelisser (2008) desenvolveram um estudo em que o lodo produzido a partir da estação de tratamento de DAM de uma mina de carvão localizada em Treviso, no estado de Santa Catarina, era utilizado para incorporação em formulações de cerâmica vermelha.

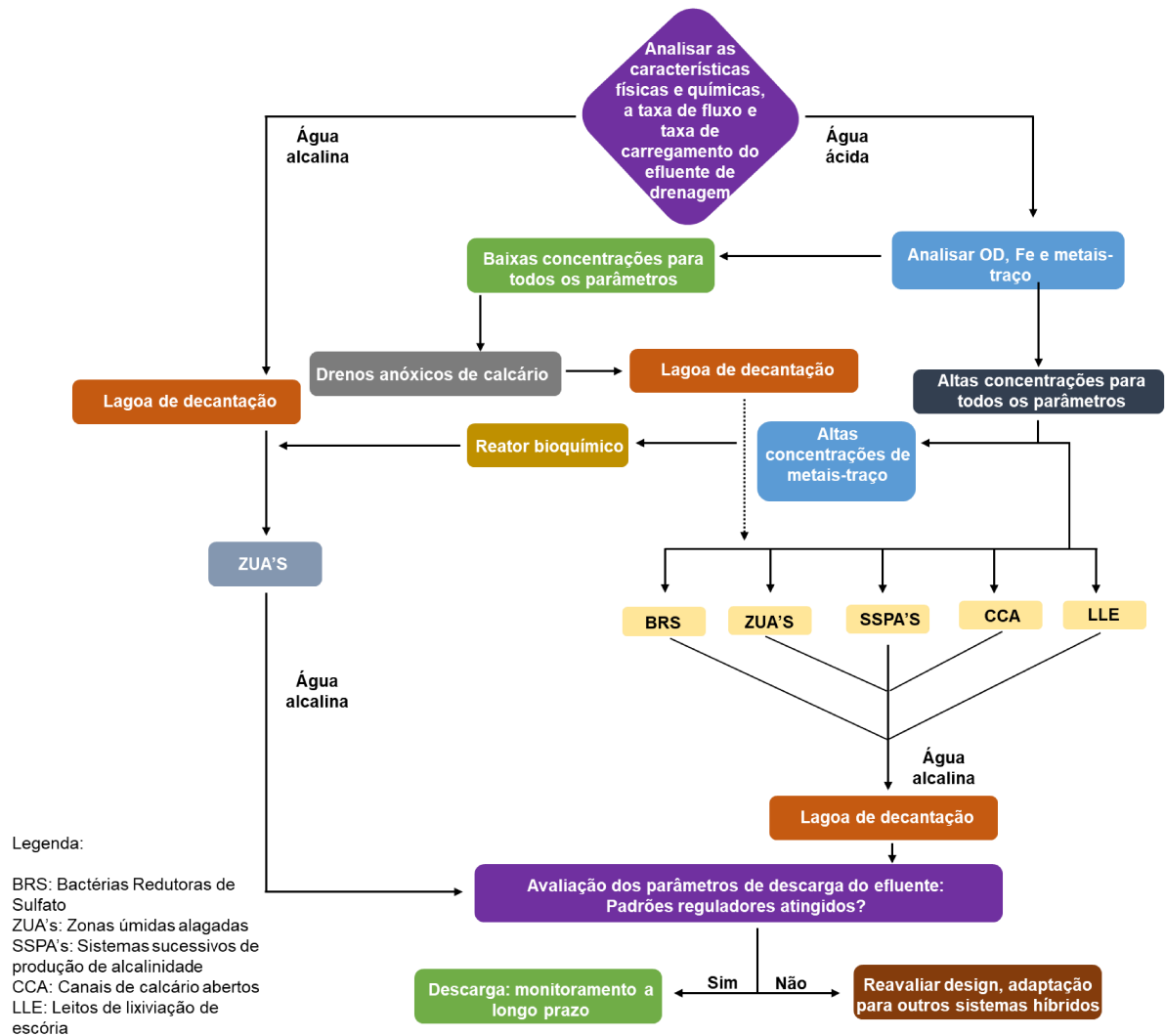
Orth *et al.* (2014) estudaram a aplicação do efluente de DAM de uma mina de carvão na região carbonífera de Criciúma, em Santa Catarina, na recuperação de alumínio em lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), gerando um coagulante que atuaria na remoção de cor e turbidez da água para abastecimento.

Outro ponto desfavorável a ser considerado, quando são mencionadas tecnologias passivas, é o fato de que, na maioria das vezes, elas não são adequadas para o tratamento de todas as águas contaminadas com DAM. Desta forma, é necessária a utilização de outros métodos de tratamento para que o efluente atinja condições adequadas para lançamento no meio ambiente. Complementarmente, é preciso destacar que os efluentes que indiquem altas concentrações de ferro férrico ou alumínio, tais métodos só serão eficientes em um curto prazo, dado o acúmulo de precipitados de hidróxido (JOHNSON, HALLBERG, 2005; ROYCHOWDURY *et al.*, 2015).

Diante da ampla gama de soluções para tratamento passivo de efluentes contaminados com DAM, a Figura 3 indica um fluxograma que auxilia na tomada de

decisão quanto à escolha do tipo de tratamento passivo, considerando um projeto de estação de tratamento que seja eficaz em função das características do efluente.

Figura 3: Fluxograma de Tomada de Decisão para o Projeto do Sistema de Tratamento Passivo.



Fonte: Adaptado de Roychowdury *et al.*, 2015.

Os sistemas sucessivos de produção de alcalinidade (SSPA) são diversos sistemas redutores e produtores de alcalinidade consecutivos, construídos de forma que o efluente ácido irá percolar inicialmente em fluxo descendente, a partir de uma camada de composto que irá remover o oxigênio dissolvido, facilitando a redução dos elementos sulfato e ferro. O leito seguinte é composto por calcário e cascalho, adicionando alcalinidade ao efluente, seguido de zonas úmidas alagadas aeróbicas ou lagoas de decantação, que têm o objetivo de reter os hidróxidos de ferro (ROUCHOWDURY *et al.*, 2015).

Métodos de tratamento biológico

Alguns autores, como Rambabu *et al.* (2020) dividem as tecnologias de tratamento biológicas de DAM entre tratamentos biológicos passivos e ativos, além daqueles que utilizam BRS.

Os sistemas de tratamento biológico passivo utilizam de processos geoquímicos naturais, em conciliação com a capacidade de alguns microrganismos em imobilizar metais e gerar alcalinidade. Estes processos estão geralmente relacionados com reações de redução, como a desnitrificação, a metanogênese, a redução de sulfato e a redução de ferro e manganês. A eficiência destes sistemas depende das características do efluente a ser tratado, podendo ser mencionados o pH, a temperatura, a salinidade, a concentração de metais, dentre outros (JOHNSON; HALLBERG, 2005; RAMBABU *et al.*, 2020).

Dentro da categoria os métodos de tratamento de DAM envolvendo processos biológicos passivos, podem ser mencionados métodos como injeção de substrato, barreira reativa permeável, leito de infiltração, lagoas anóxicas e pântanos anaeróbicos. Além disso, algumas tecnologias de remediação em áreas alagadas também foram pesquisadas, sendo adotados processos como a remediação com algas, conhecido como fitorremediação (JOHNSON; HALLBERG, 2005; RAMBABU *et al.*, 2020).

As opções de tratamentos biológicos ativos envolvem o uso de biorreatores, sendo utilizados recursos como troca iônica, leito fluidizado, membranas, dentre outras. A diferença entre os tratamentos biológicos passivos e ativos se dá diante do fato de que, nos biológicos passivos há operação em conjunto com o ambiente circundante, ao contrário dos biológicos ativos, que criam um ambiente não-natural (JOHNSON; HALLBERG, 2005; RAMBABU *et al.*, 2020; IGHALO *et al.*, 2022). A Tabela 3 indica as comparações entre as características dos tratamentos biológicos passivos e ativos.

Tabela 3 – Características e Comparações entre os Métodos de Tratamento Biológicos Passivos e Ativos.

Características	Tratamento passivo	Tratamento Ativo
Custo de operação	Relativamente baixo (US\$ 0,3–US\$ 0,4/kg de metal removido) ¹	Relativamente alto ((US\$0,7–\$1/kg de metal removido) ¹
Exigência de mão de obra	Menor	Maior
Área de Tratamento	Grande (0,1–2 m ² /kg de metal removido) ²	Pequena (0,01–0,2 m ² /kg de metal removido) ²
Recuperação de metais	Difícil	Fácil
Controle de sistema	Pobre	Bom
Previsibilidade de efluentes	Pobre	Bom

Fonte: Adaptado de Rambabu *et al.*, 2020.

3.3.1 Abordagem dos tratamentos da DAM em minas paralisadas ao longo do tempo

Os primeiros estudos relacionados com o tratamento da drenagem ácida de minas abandonadas foram desenvolvidos ainda nos anos 90. Em 1996, Christensen, Lake e Lien desenvolveram um estudo em escala de bancada, utilizando bactérias redutoras de sulfato para remediar a DAM de uma mina de cobre-zinco na Noruega, abandonada em 1983. Os autores concluem que, após o início do processo de redução de sulfato nos reatores, os metais foram removidos e o pH foi aumentado. Dessa maneira, o estudo indica o tratamento de DAM via BRS *in situ* como uma proposta de baixo custo de implementação e manutenção, principalmente em minas de pequeno porte.

Ainda na década de 1990, na Inglaterra, o efluente de uma mina de estanho abandonada foi escolhido por Hamilton (1999) para a implementação de uma planta de tratamento passivo em escala piloto em longo prazo. A planta era composta por três sistemas independentes: leito anaeróbio para promover a precipitação de ferro em hidróxido; células anaeróbias produzindo sulfetos metálicos insolúveis (BRS), removendo zinco, cádmio e cobre; filtros de rocha utilizando algas para elevar o pH, precipitando o manganês. Os autores discutem que ao longo da operação da planta, houve redução das concentrações de ferro e remoção de arsênio abaixo dos limites

¹ O custo geralmente representa despesas de capital operacionais. O custo de manutenção do tratamento ativo é de 5 a 10 vezes maior do que o tratamento passivo.

² Os valores reais podem variar dependendo da geografia, volume da DAM, composição específica da DAM e seu(s) poluente(s), condições climáticas e outros fatores de influência.

de detecção nas células anaeróbias. Além disso, o percentual de remoção nos filtros de rocha atingiu a faixa de 97%.

Nos anos 2000, deu-se início à aplicação de métodos de tratamentos passivos em escala real, envolvendo bacias de contenção (*wetlands* construídos) em conjunto com leitos de lixiviação ou lagoas de tratamento microbiano em minas abandonadas. Simmons, Ziemkiewicz e Black (2002) implementaram o uso de leitos de lixiviação de escória de aço para realizar o tratamento de DAM na mina abandonada de McCarty, no Condado de Preston, em West Virginia. O estudo conclui que os leitos de escória utilizados trataram toda a acidez do efluente de DAM, no entanto, maior monitoramento do efluente da saída do sistema era necessário, visando entender a efetividade do sistema em longo prazo, dada a preocupação com as concentrações de alumínio dissolvido advindo da escória.

Ainda no contexto de métodos passivos em escala real, utilizando zonas alagadas, Kalin e Caetano Chaves (2003) implementaram uma estação de tratamento biológico, utilizando quatro lagoas de oxidação, precipitação e decantação, e três lagoas de tratamento microbiano que operaram em série no sistema, em uma mina abandonada localizada no município de Nova Lima, MG. Segundo os autores, o sistema operou melhor que o esperado ao longo de dois anos, necessitando de algumas adaptações nas três primeiras lagoas para que a remoção do ferro fosse mais efetiva. A estação foi considerada pelos autores como adequada para o tratamento de DAM em minas abandonadas.

Whitehead, Cosby e Prior (2005) elaboraram um estudo detalhado sobre a determinação de um sistema de tratamento passivo em escala piloto em uma mina abandonada, denominada Wheal Jane, localizada em Cornwall, no Reino Unido. A planta de tratamento proposta utilizava de uma usina de tratamento composta por três sistemas, contendo canteiros aeróbicos, células anaeróbicas e filtros de rocha, todos utilizando de zonas alagadas, com três pré-tratamentos distintos para aumentar o pH do efluente. Neste estudo, foi possível concluir, a partir dos ensaios empregados, que o sistema integrado de zonas úmidas estudado é um protótipo genérico e dinâmico, que pode ser modelado e configurado de acordo com a necessidade.

Rötting *et al.* (2008) testaram, também em escala piloto, um sistema passivo de tratamento de DAM na mina de pirita abandonada “Monte Romero”, localizada no sudoeste da Espanha, utilizando um tanque de substrato alcalino disperso, contendo camadas de areia e cascas de madeira. O estudo foi desenvolvido em longo prazo (quatorze anos de monitoramento). Nesta pesquisa, os autores afirmam que a remoção de ferro a partir da oxidação de Fe II a Fe III no tanque de alcalino disperso esteve limitada à presença de oxigênio dissolvido, e que o tanque deve ser considerado como um sistema de tratamento eficiente, porém, “menos passivo”.

O estudo intitulado “*Bioremediation of acid mine drainage in a uranium deposit*” (GROUDEV *et al.*, 2008) avaliou a utilização de um sistema passivo de tratamento de DAM, que era composto por zonas úmidas naturais e construídas, drenos de calcário alcalinizantes, multibarreiras reativas permeáveis e um filtro de rocha, usados separadamente ou em diferentes combinações. Este estudo foi aplicado em escala real, em uma mina de urânio abandonada, localizada na Bulgária, e o acompanhamento da eficiência do tratamento foi analisada ao longo de dez anos. Os autores concluem o estudo informando que tratamentos passivos em longo prazo, considerando mais de dez anos, podem ser efetivos quando utilizadas áreas úmidas de grande porte com vegetação emergente, desde que o efluente de entrada do sistema passe por um pré-tratamento, atingindo condições adequadas. Como etapa de pré-tratamento, os autores sugerem o uso de barreiras reativas permeáveis para fins de neutralização química, bioissorção de poluentes e redução de sulfato.

Sierra, Saiz e Gallego (2013) desenvolveram um estudo envolvendo membranas de nanofiltração no tratamento de DAM em uma mina de mercúrio abandonada na Espanha. O objetivo da pesquisa, realizada em escala piloto, era avaliar as taxas de remoção de íons As, Al, Fe e SO_4^{2-} a partir da nanofiltração. Os resultados do estudo apontaram que a membrana utilizada obteve um alto rendimento, e, quando utilizadas pressões moderadas, os custos de operação da planta piloto puderam ser reduzidos. A efetividade do tratamento foi constatada mesmo com um efluente de baixo pH.

Dean *et al.* (2013) desenvolveram uma pesquisa em escala real, que avaliava a atuação de uma zona úmida natural (associação de plantas e bactérias acidófilas) para tratamento de DAM de uma mina de cobre abandonada, ao longo de quatorze

anos. Em uma das estações monitoradas, o pH, que apresentava medida de aproximadamente 2,5 entre 1997 e 2003, aumentou para 5,6 em 2009/2010. Além da alteração percebida para o pH, houve redução nas concentrações de metais dissolvidos como ferro, zinco e cobre, e as melhorias da qualidade da água puderam ser percebidas em ensaios envolvendo organismos bentônicos. A conclusão do estudo é de que a zona úmida é de fato eficiente se tratando de uma remediação de DAM em longo prazo, sendo um sistema autossustentável para uso durante, ao menos, um século.

Outros estudos relacionados à DAM em minas abandonadas foram desenvolvidos em escala real, em países como os Estados Unidos e a Coréia, elaborados por Crafton *et al.* (2019) e Shim (2015). Tais pesquisas envolveram métodos passivos/biológicos, utilizando operações unitárias como lagoas anaeróbias e leito de calcário, testando a eficácia em longo prazo (10 anos ou mais). O estudo de Shim (2015) atribui a redução de elementos como ferro, manganês, cobalto, lítio, níquel e chumbo nos córregos estudados à adição de calcário e o respectivo aumento de pH. Para que o desempenho dos leitos de calcário seja ainda melhor, o autor discute sobre a possibilidade de utilizar maiores quantidade de produto, ou de um material com menor granulometria e maior área superficial. Apesar dos resultados satisfatórios, a pesquisa conclui que o uso de tecnologias alternativas em conjunto com a implementada pode trazer maior eficiência em longo prazo.

Já o estudo de Crafton *et al.* (2019) demonstrou excelente desempenho para o tratamento de DAM, removendo metais como alumínio, manganês e ferro do efluente tratado de maneira consistente ao longo de treze anos, sem manutenção do sistema de *wetlands* construídos e conjunto com o leito de calcário.

3.4 Medidas de prevenção e controle da DAM na perspectiva da Produção mais Limpa (P+L)

Uma vez que já foram entendidos os impactos decorrentes das atividades de mineração, principalmente quando da geração de DAM, além das perspectivas de tratamento estudadas ao longo dos anos, é necessário que sejam avaliadas também as medidas de controle e prevenção.

Este questionamento levanta a importância da adoção de uma abordagem voltada para a Produção mais Limpa (P+L) em indústrias de mineração. O conceito de P+L foi desenvolvido pela UNIDO – *United Nations for Industrial Development* e pela UNEP – *United Nations Environmental Program* na década de 1980. Esta metodologia está voltada para a prevenção da poluição, buscando evitar o desperdício de energia, ocasionado a partir da geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que estão diretamente relacionados com os impactos ambientais (KIPERSTOK, 2002).

Considerando os conceitos abordados (P+L e prevenção da poluição), algumas ferramentas podem ser utilizadas para mensurar os impactos ambientais advindos de atividades como a mineração, de modo a explorar medidas que irão agregar valor econômico ao setor em questão. Neste sentido, a Análise de Ciclo de Vida (ACV), por exemplo, visa avaliar encargos ambientais que estão associados a um produto, processo ou atividade, a partir da quantificação da energia e dos materiais utilizados, além dos resíduos dispostos no meio ambiente, avaliando o impacto causado na produção de um bem, assim buscando encontrar soluções ambientais e melhorias no processo produtivo (KIPERSTOK, 2002).

A correlação entre a atuação do setor mineral com o ciclo de vida de seus produtos foi levantada pelo IBRAM, em 2022, com o auxílio de algumas empresas de mineração atuantes no Brasil. O E-book “Práticas em circularidade no setor mineral” foi lançado com o objetivo de fomentar no setor mineral a prática de se buscar soluções tecnológicas para seus produtos, aperfeiçoando os resultados ambientais nos resíduos de mineração. No documento, constam algumas iniciativas voltadas para o aproveitamento de efluentes, além de rotas para redução das concentrações de sulfato do efluente de plantas metalúrgicas (IBRAM, 2022). O segundo projeto mencionado é muito interessante do ponto de vista da DAM, e demonstra um passo inicial das mineradoras em busca de métodos de prevenção e controle da DAM em suas operações.

Johnson e Hallberg (2005) nomeiam as práticas de prevenção à DAM como “controle de origem”, e sugerem que tais medidas sejam implementadas considerando a exclusão de um dos fatores favoráveis à formação de DAM, como a água e o oxigênio. Naidu *et al.* (2019) mencionam que, além dos elementos já citados, a proteção dos

minerais sulfetados também se caracteriza como medida de prevenção, quando consideradas as bactérias redutoras que podem estar presentes no meio.

Um ponto comum levantado em algumas pesquisas que abordam a temática de medidas de prevenção, é o fato de que essas ações não são de fácil implementação. Uma medida eficaz que pode ser implementada em minas com operação subterrânea é o selamento das aberturas com respectiva deposição do rejeito nas galerias, de forma que o ar e o oxigênio não terão contato com o minério no interior das galerias, evitando, assim, a oxidação de sulfetos (JOHNSON; HALLBERG, 2005; KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

Um estudo de levantamento das técnicas de prevenção, baseadas na eliminação dos componentes formadores de DAM mencionados, foi realizado por Park *et al.* (2019). De acordo com os autores, os principais métodos de prevenção aplicáveis são o uso de barreiras de oxigênio, de bactericidas atuando sob bactérias acidófilas, a co-disposição e mistura de rejeitos, via materiais básicos como cal, calcário e afins, além da passivação e microencapsulação, diante da aplicação de cobertura das superfícies com revestimentos orgânicos. Os autores mencionam, ainda, que a ausência de estudos voltados para a prevenção da DAM é notória.

3.5 Padrões de qualidade da água nas esferas estadual e federal e a nível internacional

No estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa (DN) Conjunta do Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) número 08, de 21 de novembro de 2022 “dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições, padrões e parâmetros de lançamento de efluentes em corpos d' água receptores.” (COPAM CERH, 2022).

Já em caráter nacional, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), número 430, de 13 de maio de 2011, determina os padrões e condições de lançamento de efluentes comuns e efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em corpos receptores. São delimitados limites para parâmetros como óleos e graxas, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH, temperatura e materiais sedimentáveis, além de parâmetros inorgânicos e orgânicos.

Seguindo para normas internacionais que oferecem o mesmo tipo de padrão para lançamento, na América do Sul é disponibilizada pelo Ministério Secretaria Geral da Presidência do Chile o Decreto 90, de 07 de março de 2001. A referida norma estabelece padrões de lançamento de poluentes associados à descarga de efluentes líquidos em águas superficiais, continentais ou marinhas em todo o território da República do Chile. Similarmente aos padrões brasileiros, a norma chilena envolve limites para parâmetros orgânicos e inorgânicos.

Dentro dos diversos títulos disponíveis no Código de Regulamentos Federais (*Code of Federal Regulations* - CFR) dos Estados Unidos da América, o título de número 40 representa a proteção do meio ambiente. O capítulo I do respectivo título se refere à Agência de Proteção Ambiental, que, por sua vez, indica no subcapítulo N as diretrizes e os padrões de efluentes. Na sequência, a parte de número 437 representa a categoria de origem do ponto centralizado de tratamento de resíduos, e a subparte A trata especificamente do tratamento e recuperação de metais. Seguindo para o inciso 437.14, tem-se os novos padrões de desempenho de fonte. Neste inciso, são exibidos limites para parâmetros convencionais, tais quais óleos e graxas, pH e sólidos suspensos totais, além de padrões para diversos metais.

Essas normativas foram mais bem exploradas na seção de resultados e discussão, e os valores e padrões de referência dos parâmetros de interesse deste estudo, explorados nestas normativas, foram dispostos em tabelas e descritos individualmente.

4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica diante da necessidade de atendimento às normas e boas práticas no quesito do fechamento de mina, em se tratando de obtenção da estabilidade química de uma área de mineração. O conceito de drenagem ácida de mina vem sendo amplamente discutido na comunidade científica, sem, no entanto, apresentar uma abordagem na perspectiva do fechamento de mina e da real necessidade de manutenção das condições de estabilidade química em longo prazo.

Diante disso, pretende-se preencher a lacuna identificada no quesito apresentado, a partir da avaliação de técnicas para tratamento de drenagem ácida de mina oferecidas pelo mercado, considerando a perspectiva de resultados em longo prazo, mesmo

após o encerramento das obrigações legais da empresa com o território. Conforme apresentado na revisão de literatura, a aplicação e avaliação destes conceitos considerando um cenário de fechamento de uma mina é de extrema importância, pois a principal fonte de contaminação proveniente da DAM é correlacionada às minas abandonadas.

5 METODOLOGIA

5.1 Revisão sistemática de literatura

Para balizar este estudo, foram selecionados para apreciação estudos prévios publicados de quais métodos de tratamento associado à DAM estão sendo aplicados no contexto nacional e internacional. A partir deles, buscou-se aprofundar, discutir e atender os objetivos principais do estudo em função daqueles métodos mais utilizados.

De acordo com Galvão e Pereira (2014), existem algumas etapas que podem ser utilizadas na revisão sistemática de literatura (RSL) sendo selecionadas as seguintes para a elaboração do presente estudo: a escolha da pergunta de pesquisa; a busca na literatura; a escolha dos artigos; a extração de informações e dados pertinentes; a síntese dos dados, conhecida como meta-análise, e, por fim, a redação e publicação dos resultados.

O detalhamento de cada uma das etapas mencionadas está descrito na sequência.

Escolha da pergunta de pesquisa

A principal pergunta que envolveu o direcionamento da pesquisa foi “quais os principais métodos de tratamento de DAM são estudados e aplicados pela comunidade científica nacional e internacional?”.

Busca na literatura

De acordo com Galvão e Ricarte (2019), um fator importante a ser definido dentro da metodologia de RSL é a escolha das bases de dados que serão utilizadas para concretizar a procura por artigos. Assim sendo, a busca por publicações de periódicos foi realizada por meio de pesquisa sistêmica em plataformas como *Scopus*, *Science*

Direct, Mendeley e Google scholar, a partir das palavras-chave em português: “tratamento drenagem ácida”, e em inglês “*acid mine drainage treatments*”.

Escolha dos Artigos e Extração de Informações Pertinentes

Em se tratando de um tema atemporal, com impactos identificados há longo prazo, como anteriormente esboçado, não foi definida escala temporal para a escolha de publicações, a fim de se obter o maior número de informações possíveis a respeito dos tratamentos para DAM que foram e vêm sendo estudados e consolidados em um viés científico, e quais deles estão de fato voltados para solucionar essa problemática em longo prazo.

Diante disso, foram aplicados alguns critérios de seleção e/ou exclusão. Foram selecionadas publicações que continham informações mínimas a serem utilizadas a posteriori na pesquisa, tais como:

- Tipo de minério extraído;
- Tipo de tecnologia de tratamento (passiva, ativa ou biológica);
- Descrição dos métodos adotados;
- Principais contaminantes presentes no efluente estudado.

Além dessas informações, também foram extraídos dados para compor as métricas que foram desenvolvidas e avaliadas em itens subsequentes dessa sessão, tais quais ano de publicação, escala dos estudos (piloto, bancada, dentre outros) e país em que o estudo foi elaborado.

Ao todo foram selecionadas cento e quarenta e sete publicações e a relação completa de periódicos levantados e suas respectivas informações retiradas estão dispostos na Tabela do Apêndice A. As publicações mais antigas obtidas são da década de 1960, desenvolvidas por Bloom, Jennings e Bisque (1969), Harrison (1969) e Wayman (1969). Os estudos mencionados não foram encontrados disponíveis na íntegra, contendo apenas um pequeno resumo em cada uma delas. Porém, estes trabalhos foram mantidos na lista selecionada para a presente pesquisa, visto que são os registros mais antigos de estudos na temática da DAM, e, por isso, foram considerados importantes, em vistas a manter tal registro.

Os estudos mais atuais selecionados para comporem a atual pesquisa foram publicados no ano de 2023, elaborados por Gandy *et al.*, Mothetha *et al.*, Noor *et al.* e Kislioglu, e foram desenvolvidos na Inglaterra, na África do Sul, na Indonésia e na Turquia, respectivamente.

Síntese dos dados (meta-análise)

A síntese dos dados analisados foi realizada de modo a agregar as informações e características dos efluentes de DAM, considerando o efluente de entrada e de saída dos métodos de tratamento, quando aplicável. Mais detalhes sobre essa etapa serão descritos no item 5.2 deste documento.

Redação e publicação dos dados

A partir de cada uma das etapas descritas, foi possível separar os estudos publicados por categorias, a fim de melhorar a visualização de informações mais pertinentes para a presente pesquisa, conforme explicado anteriormente.

As informações extraídas dos estudos selecionados, disponibilizadas na Tabela do Apêndice A, permitiram a elaboração de diferentes gráficos, que serviram como ferramenta para avaliar os contextos nos quais os tratamentos de DAM estão sendo utilizados desde o início da realização de pesquisas na área.

As análises consistiram na junção das informações mencionadas e na respectiva divisão entre os dados disponíveis. Foram determinados alguns blocos de dados para análise, os quais são relacionados a seguir:

- Quantificação de estudos envolvendo métodos de tratamento ativos, passivos e biológicos;
- Detalhamento dos países em que os estudos foram aplicados;
- Identificação de quais tipos de minério extraídos foram mais presentes na elaboração dos estudos científicos;
- Quantificação dentro da seleção de pesquisas quanto à escala de aplicação (quantos estudos estiveram de fato voltados para remediar a DAM em escala real?);

- Identificação da quantidade de estudos que estiveram relacionados com minas abandonadas/paralisadas;
- Identificação da quantidade de estudos que estiveram relacionados com tratamentos em longo prazo.

A avaliação dos grupos de dados citados permite, ainda, identificar alguns pontos de relação entre as informações: é possível relacionar o tipo de método de tratamento com o avanço da tecnologia ao longo do tempo? Há correlação entre o ano de desenvolvimento de uma pesquisa e a escala de aplicação (estudos mais recentes tendem a executar aplicações reais?)

5.2 Métricas dos estudos selecionados

Após a revisão de literatura e respectiva seleção de estudos, algumas métricas foram extraídas e avaliadas individualmente por meio de gráficos e tabela. Nessa análise foram consideradas as seguintes métricas:

- Quantificação de estudos de tratamento de DAM ao longo do tempo;
- Quantificação de estudos por tipo de método de tratamento de DAM ao longo do tempo;
- Tipos de minérios e número de repetições nas pesquisas selecionadas;
- Correlação entre as tecnologias de tratamento de DAM utilizadas para cada tipo de minério;
- Autores, duração, ano, método e escala de aplicação de métodos de tratamento de DAM em longo prazo.

Considerando as análises provenientes de estudos que avaliaram a eficiência dos tratamentos em longo prazo, foi identificado que, de cento e quarenta e sete estudos selecionados, quinze atendiam este critério. O termo “longo prazo” pode trazer interpretações muito subjetivas, uma vez que cada autor considerou uma escala de tempo diferente. Por isso, no presente estudo considerou-se como longo prazo os tratamentos que foram aplicados em um prazo maior ou igual a um ano, ou seja, 365 dias.

5.3 Caracterização dos efluentes de DAM

Compreendidas as informações relevantes da totalidade de pesquisas, dezessete estudos foram selecionados para compor a etapa de caracterização dos efluentes, pois são estudos que apresentam mais detalhamento quanto à análise de qualidade dos efluentes. Além disso, tais trabalhos foram publicados em periódicos de alto fator de impacto, com grande visibilidade na comunidade científica. Outro critério de seleção foi a decisão de não considerar estudos que envolvem a utilização de efluentes sintéticos gerados em laboratório, como uma tentativa de manter as caracterizações mais próximas possíveis da realidade de uma mina de extração de metais sulfetados. A análise também foi realizada considerando os estudos que possuíam as características dos efluentes de entrada e saída dos tratamentos utilizados.

A caracterização dos efluentes nos estudos publicados contam com resultados de amostragem na entrada e na saída dos sistemas de tratamento, a partir da análise de parâmetros físico-químicos e metais, sendo essas variáveis as mais influentes em relação à DAM.

Para cada um dos estudos selecionados, foram identificados quais parâmetros cada pesquisa abordou, tanto na entrada, quanto na saída dos sistemas de tratamento, como etapa preliminar. A partir disso, na segunda etapa foi possível determinar quais variáveis podem ser consideradas mais importantes na composição de um efluente de DAM, em vistas à frequência em que elas apareceram nos estudos selecionados para essa etapa da metodologia.

Após a etapa de seleção de parâmetros mais citados nos estudos selecionados, foram elaboradas tabelas indicando as faixas de variação entre os parâmetros analisados nos efluentes de entrada e de saída.

Na sequência, de posse das faixas de variação da concentração dos elementos, foram analisados os percentuais de remoção dos valores máximos e mínimos de cada parâmetro para os estudos selecionados. Para uma análise mais acurada, foram levantados quais tipos de método de tratamento de DAM foram adotados para os estudos selecionados, e, na sequência, foi realizada uma comparação entre os

maiores percentuais de remoção e o tipo de tratamento, por parâmetro, de forma a permitir uma avaliação de quais métodos podem ser considerados mais efetivos na remoção da DAM ou de algum elemento de maneira isolada.

Os resultados da saída dos sistemas foram ainda comparados aos padrões das legislações aplicáveis aos padrões de lançamento e de qualidade das águas, conforme DN Copam CERH nº 08/2022 (Minas Gerais), Resolução Conama nº 430/2011 (Brasil), Decreto nº 90/2001 (Chile) e *CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source, Subpart A, Metals Treatment and Recovery* - nº 437.14 (EUA). Essas legislações foram selecionadas pois ditam padrões de qualidade relacionados ao lançamento de efluentes industriais, para que pudessem ser avaliados se os métodos de tratamento que foram empregados nos estudos geraram efluentes que obedecem aos limites empregados pelas normas. Duas normas internacionais foram selecionadas para obtenção de valores de referência mais ou menos restritivos.

Como etapa final da caracterização do efluente, foi realizada uma análise individualizada de cada parâmetro selecionado e suas concentrações máximas e mínimas, oferecendo uma caracterização mais aprofundada da contribuição dos elementos na composição do efluente de DAM.

5.4 Levantamento de tecnologias oferecidas pelo mercado

Esta etapa metodológica consistiu na busca por empresas que oferecessem soluções relacionadas à DAM para mineradoras, a fim de realizar um levantamento das opções que vêm sendo oferecidas na atualidade, com seus respectivos custos de implantação. Este levantamento envolveu duas etapas, sendo a primeira a busca por empresas que atuam no ramo de tratamento de DAM e que oferecem opções de tratamento para este tipo de efluente.

Após este levantamento, a segunda etapa consistiu no contato direto com a empresa via *e-mail* comercial disponível no *site*, solicitando catálogos dos serviços prestados.

Os dados solicitados foram:

- Tipo de tratamento oferecido;
- Durabilidade estimada do tratamento;
- Faixa dos custos de operação;

- Custos de manutenção.

Após o contato via e-mail, foi realizada uma segunda tentativa de contato com as empresas que não retornaram as solicitações, dessa vez a partir de telefone/WhatsApp disponíveis como contato comercial nos *sites* das empresas. Optou-se por não divulgar nesta pesquisa o nome das empresas, para evitar possíveis indisposições futuras, e, nesse caso, os nomes foram representados com letras do alfabeto.

Além da busca no mercado, foram selecionados os estudos de Hedin *et al.* (2010), Aguiar *et al.* (2016), Masindi *et al.* (2018) e Wibowo *et al.* (2022), da revisão disposta na Tabela do Apêndice A, que trouxeram em seu conteúdo algumas comparações de preços dos métodos de tratamento de DAM em caráter internacional. A utilização de ambas as fontes de pesquisas relacionadas aos custos de implementação e operação de tecnologias para tratamento de DAM permitirá a realização de uma comparação entre a atuação do mercado brasileiro em vistas às soluções internacionais, visto que a DAM tem se mostrado um problema existente em escala mundial.

Destaca-se que se tratando de empresas que atuam no mercado brasileiro, os valores trabalhados foram inicialmente disponibilizados em real brasileiro. Porém, dada a preocupação com a volatilidade da moeda real, e buscando valores mais estáveis e próximos da realidade, facilitando ainda a comparação com os estudos, os preços levantados foram transformados em dólar americano. A cotação considerada foi a do dólar comercial, do dia 30 de janeiro de 2024, na proporção de 1 USD para 4,96 BRL. Além disso, os valores cotados anteriormente ao ano de 2023 foram atualizados conforme a inflação de cada país. Essa aplicação de inflação foi direcionada para todos os anos entre o ano de elaboração do estudo e o ano de 2023.

5.5 DAM no contexto do Estado de Minas Gerais, do Brasil e do mundo

Considerando os impactos que a DAM pode ocasionar às águas superficiais e subterrâneas no entorno de uma mina, ou além deste raio, considerou-se importante para o presente estudo que fossem pesquisadas as formas de atuação do Estado de Minas Gerais frente a este problema.

Neste sentido, foram realizadas buscas nos sites da SEMAD (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável) e da FEAM quanto ao tema de fechamento de minas, áreas contaminadas, gerenciamento de efluentes, regulamentações para empresas de mineração e exigências das etapas de licenciamento para atividades minerárias. Essa etapa também tem o objetivo de identificar nas normas aplicáveis os valores de referência para lançamento de efluentes no meio ambiente, para fins de comparação com as faixas de concentração obtidas nas etapas metodológicas anteriores.

Este estudo possui a preocupação de não limitar a sua aplicabilidade apenas ao estado de Minas Gerais. Além disso, foi considerado importante a obtenção de uma maior amplitude de informações e documentos de apoio para entender sobre a atuação de órgãos competentes na fiscalização da DAM. Assim sendo, foram pesquisados também normas, legislações, manuais e demais arquivos de interesse nos *sites* de instituições pertinentes ao assunto de países como Brasil, Estados Unidos da América, Canadá, China, Inglaterra e África do Sul, visto que estes possuem influência relevante na quantidade de estudos voltados para a DAM na literatura consultada. Foi dada ênfase para casos reais em mineradoras, considerando a proporção de problemas originários da DAM em escala mundial.

Todas as informações encontradas foram compiladas e auxiliaram na análise de potencialidades e fragilidades na atuação do órgão ambiental em relação à permanência da DAM em uma área de mineração ao longo do tempo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

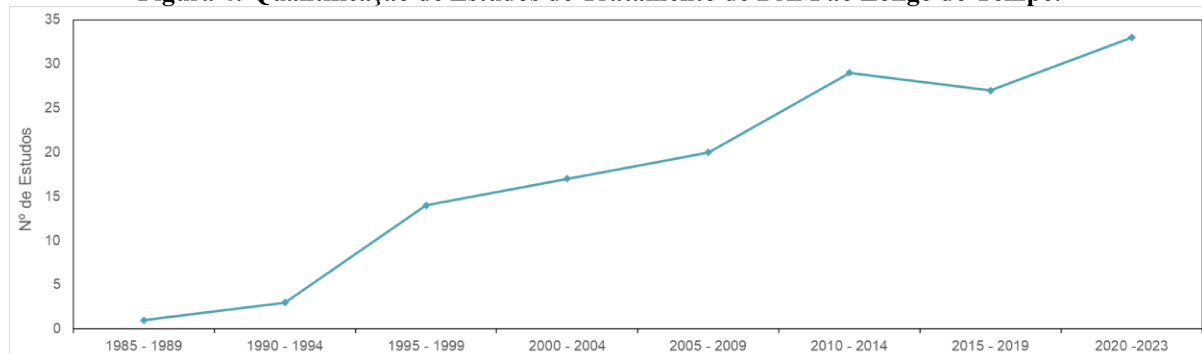
6.1 Métricas dos estudos selecionados

Conforme descrito no item de metodologia, a seleção de artigos em periódicos foi realizada considerando requisitos mínimos que permitissem avaliar criteriosamente as principais métricas dos estudos.

À vista disso, o gráfico mostrado na Figura 4 permite avaliar em quais anos o tema de tratamento de DAM estavam mais em destaque, bem como períodos de baixo desenvolvimento de estudos na área. Por sua vez, o gráfico da Figura 5 mostra a quantidade de trabalhos desenvolvidos nesta temática em função do tipo de tratamento aplicado.

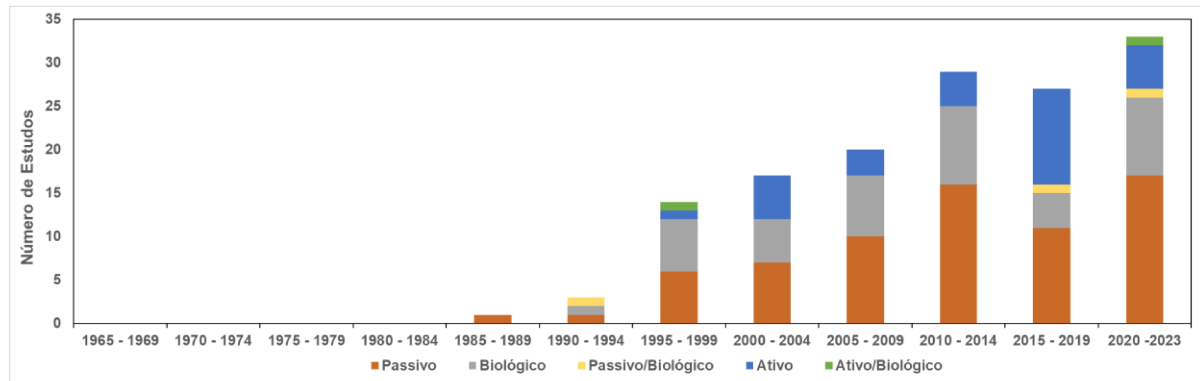
Essa avaliação possibilita acompanhar o início do desenvolvimento de estudos relacionados ao tratamento de DAM, e a partir de quando o tema se tornou mais investigado. Os dados do número de publicações em função do ano foram separados em uma escala de tempo de cinco em cinco anos, exceto o último período que inclui os anos de 2020 a 2023.

Figura 4: Quantificação de Estudos de Tratamento de DAM ao Longo do Tempo.



Fonte: Autora (2023).

Figura 5: Quantificação de Estudos por tipo de Método de Tratamento de DAM ao Longo do Tempo.



Fonte: Autora (2023).

A interpretação do gráfico da Figura 4 revela que a partir de 1990 houve crescente aumento no número de estudos voltados para o tratamento de DAM, atingindo o ápice do número de ocorrências de pesquisas no último período (2020 – 2023), devendo ser considerado o fato que este período inclui um ano a menos que os demais. Este crescente aumento pode estar relacionado a fatores como o desenvolvimento tecnológico e a visibilidade que vem sendo empregada aos impactos ambientais, dada a dimensão que vem sendo dada aos termos de sustentabilidade, associados à prática ESG (*Environmental, Social and Governance*). O Termo ESG despontou em 2004, a partir do relatório “*Who cares wins*”, nascendo a partir de um acordo global para aprimorar as práticas ambientais, sociais e de governança corporativa na gestão de ativos (FREITAS *et al.*, 2023).

Há um aumento saliente em relação aos demais períodos observados na transição entre os anos de 1990 – 1994 e 1995 – 1999, evento este que pode estar relacionado ao lançamento do Documento Técnico de Prevenção à Drenagem Ácida de Mina pela Environmental Protection Agency (EPA). Situação semelhante foi observada na transição entre os períodos 2005 – 2009 e 2010 – 2014, e essa alteração pode também estar vinculada à criação do “*The Global Acid Rock Drainage Guide*” (*GARD Guide*), do *International Network for Acid Prevention* (INAP), em 2009.

Já em relação à prevalência ou não de algum tipo de método de tratamento ao longo do tempo, foi possível observar que a tecnologia passiva esteve à frente das demais para a maioria dos períodos. Conforme já discutido anteriormente, os métodos de tratamento passivos são empregados há muitos anos e podem ser mais atrativos para

as empresas de mineração em vistas à sua baixa necessidade por manutenção e baixo custo de implantação.

Quanto aos tipos de minério mais estudados, a Tabela 4 mostra os elementos e o número de repetições dentro da totalidade de pesquisas selecionadas (total de 147). A maior parte dos estudos foram desenvolvidos com a utilização de efluentes sintéticos produzidos em laboratório, com características selecionadas a partir das metodologias escolhidas por cada autor. Neste contexto, considerando estudos desenvolvidos com efluente real, os efluentes de DAM provenientes de minas de carvão foram os mais estudados, seguidos de minas de cobre, ouro, chumbo e zinco, pirita, cobre e zinco, urânio e ferro. Outros tipos de elementos explorados em minas foram estudados em menor frequência, aparecendo apenas uma vez na lista de estudos selecionados.

Tabela 4 – Tipos de Minérios e Número de Repetições nas Pesquisas Selecionadas

Tipo de Minério	Repetições
Efluente sintético gerado em laboratório	45
Carvão	28
Cobre	11
Ouro	10
Chumbo e Zinco	4
Pirita	5
Cobre e Zinco	3
Urânio	3
Ferro	2
Cobre e Ouro	1
Cobre, Chumbo e Zinco	2
Cobre-zinco e carvão	1
Cristal	1
Depósito Polimetálico	1
Efluente de uma estação de tratamento de DAM	1
Efluente rico em Arsênio	1
Enxofre (pirita e pirrotita)	1
Estanho	1
Ferro e Níquel	1
Linhito	1
Mercúrio	1
Minério de sulfeto maciço	1
Prata	1
Sulfureto	1
Tungstênio	1

Fonte: Autora (2023).

Considerando as informações das tecnologias de tratamento mais utilizadas e os tipos de elementos mais estudados, a Tabela 5 apresenta a correlação entre essas informações, assim possibilitando a análise de qual tratamento é mais empregado para os minérios abordados nos trabalhos.

Tabela 5 – Correlação entre as Tecnologias de Tratamentos de DAM Utilizadas para cada Tipo de Minério

Tipo de Minério	Passivo	Biológico	Passivo/ Biológico	Ativo	Ativo/ Biológico
Efluente sintético gerado em laboratório	18 - (40%)	18 - (40%)	1 - (2,22%)	6 - (13,33%)	2 - (4,44%)
Carvão	17 - (60,71%)	4 - (14,28%)	1 - (3,57%)	6 - (21,43%)	-
Cobre	5 - (45,45%)	3 - (27,27%)	1 - (9,09%)	2 - (18,18%)	-
Ouro	5 - (50%)	1 - (10%)	-	4 - (40%)	-
Chumbo e Zinco	3 - (75%)	-	-	1 - (25%)	-
Pirita	3 - (60%)	-	2 - (40%)	-	-
Cobre e Zinco	-	2 - (66,67%)	-	1 - (33,33%)	-
Urânio	2 - (66,67%)	-	-	1 - (33,33%)	-
Ferro	-	1 - (50%)	-	1 - (50%)	-
Cobre e Ouro	-	-	1 - (100%)	-	-
Cobre, Chumbo e Zinco	1 - (50%)	1 - (50%)	-	-	-
Cobre-zinco e carvão	1 - (100%)	-	-	-	-
Cristal	-	1 - (100%)	-	-	-
Depósito Polimetálico	-	1 - (100%)	-	-	-
Efluente de uma estação de tratamento de DAM	-	-	-	1 - (100%)	-
Efluente rico em Arsênio	1 - (100%)	-	-	-	-
Enxofre (pirita e pirrotita)	1 - (100%)	-	-	-	-
Estanho	1 - (100%)	-	-	-	-
Ferro e Níquel	-	-	-	1 - (100%)	-
Linhito	1 - (100%)	-	-	-	-
Mercurio	-	-	-	1 - (100%)	-
Minério de sulfeto maciço	1 - (100%)	-	-	-	-
Prata	1 - (100%)	-	-	-	-
Sulfureto	1 - (100%)	-	-	-	-
Tungstênio	1 - (100%)	-	-	-	-

Fonte: Autora (2023).

Com base na Tabela 5, observa-se que para as minas de carvão, houve prevalência de utilização de métodos de tratamento passivos, assim como para as minerações de cobre, ouro, chumbo e zinco, pirita e urânio. Os métodos de tratamento biológico seguiram em segundo lugar, prevalecendo nos estudos envolvendo mineração de cobre e zinco, cristal e depósito polimetálico, sendo que nestes dois últimos elementos, apenas um estudo foi publicado para cada. Na sequência, encontram-se os métodos de tratamento ativos, seguidos dos métodos passivos/biológicos e ativos/biológicos.

Além das análises já realizadas, para auxiliar nos objetivos da presente pesquisa, foi considerado importante o levantamento de, dentre a totalidade de estudos prévios selecionados, quais se propuseram a avaliar a eficiência das tecnologias em longo prazo, quais os métodos aplicados e se o funcionamento foi satisfatório ou não, mediante o atendimento de regulamentações ambientais.

Dentro dos quinze trabalhos que avaliaram a eficiência dos tratamentos em longo prazo, o elemento mais utilizado como material explorado nas minas em estudo foi o carvão, presente em cinco estudos. Na sequência, foi identificado que, em quatro estudos, o efluente foi gerado em laboratório, de maneira sintética. Um estudo avaliou os métodos de tratamento em uma mina de pirita, e outros dois estudos investigaram a eficiência de tratamentos para efluentes de minas de cobre. Minas de estanho e cobre também foram empregadas em estudos para tratamento de DAM em longo prazo, sendo um estudo para cada elemento explorado. Por fim, um dos trabalhos não revelou o minério extraído na mina em estudo. A Tabela 6 mostra a duração dos tratamentos avaliados, o tipo de método aplicado, o ano do estudo e o tipo de minério explorado, bem como a escala de aplicação dos estudos.

Tabela 6 – Autores, Duração, Ano, Método e Escala de Aplicação de Métodos de Tratamento de DAM em longo prazo

Autor	Tempo (Dias)	Metal	Ano	Situação da(s) Mina(s)	Tipo de Método	Escala
Hamilton <i>et al.</i>	515	Estanho	1999	Abandonada	Passivo	Piloto
Bhattacharya <i>et al.</i>	730	Carvão	2007	Fechada	Passivo	Real
Groudev <i>et al.</i>	3650	Urânio	2008	Paralisada	Passivo	Real

Matthies, Aplin e Jarvis	1825	Carvão	2010	2 abandonadas e 1 fechada	Passivo	Real
Hedin <i>et al.</i>	2190	Carvão	2010	Abandonada	Passivo	Real
Dean <i>et al.</i>	5110	Cobre	2013	Paralisada	Passivo	Real
Underwood, Kruse e Bowman	4745	-	2014	Abandonadas	Passivo	Real
Shim	3650	Carvão	2015	Abandonadas	Passivo	Real
Cunha <i>et al.</i>	739	Efluente sintético gerado em laboratório	2019	-	Biológico	Bancada
Crafton <i>et al.</i>	4745	Carvão	2019	Abandonada	Passivo/Biológico	Real
Schwarz; Pérez	591	Efluente sintético gerado em laboratório	2021	-	Biológico	Bancada
Orden <i>et al.</i>	840	Pirita	2021	Abandonada	Passivo	Real
Jordan, Redington e Holland	800	Efluente sintético gerado em laboratório	2021	-	Passivo	Piloto
Lee <i>et al.</i>	365	Efluente sintético gerado em laboratório	2022	-	Ativo	Real
Hu <i>et al.</i>	365	Cobre	2022	Ativa	Biológico	Laboratório

Fonte: Autora (2023).

A análise da Tabela 6 possibilitou a interpretação de que a maioria dos estudos a longo prazo foram executados considerando métodos de tratamento passivo. Hedin *et al.* (2010) e Dean *et al.* (2013) aplicaram em suas pesquisas, métodos de tratamento de DAM que envolveram a utilização de zonas úmidas alagadas, ou *wetlands* construídos como uma operação isolada, ambos em escala real. No primeiro, foram utilizadas lagoas de fluxo vertical a partir de um SSPA, na qual foram produzidos, segundo os autores, efluentes de alta qualidade para descarga e Wilson Creek, um importante afluente do Babb Creek.

O efluente tratado indicava baixas concentrações de ferro e alumínio, e os resultados foram observados ao longo de seis anos de operação do sistema, que foi instalado no estado da Pensilvânia, pertencente aos Estados Unidos da América. É importante destacar que este estudo apresentou uma análise de eficácia do tratamento mediante variação sazonal, na qual a eficiência não variou devido à sazonalidade, apesar das bruscas variações de temperatura.

Já no estudo de Dean *et al.* (2013), o princípio do sistema de tratamento empregado foi a utilização de zona úmida natural, com associação entre plantas e bactérias acidófilas, em uma mina paralisada na Inglaterra. Conforme apresentado pelos autores, as zonas úmidas empregadas foram eficientes na remoção dos metais independentemente de fatores como o influxo de metais e da taxa de fluxo na entrada do sistema. O sistema se mostrou altamente eficiente provavelmente em função da adaptação das espécies microbianas e vegetais às condições da DAM, porém, o impacto ocasionado à biota localizada no curso a jusante do sistema ainda era incerto e carecia de estudos mais aprofundados focados para essa questão.

Nos demais estudos com zonas alagadas, estas foram empregadas como parte de um sistema de tratamento mais complexo. Bhattacharya *et al.* (2007) optaram pela utilização de um sistema sucessivo e produção de alcalinidade, composto por um sistema de *ponds* de oxidação, lagoa anaeróbia e um segundo *pond*, de menor volume, em escala real, em uma mina localizada na Coreia do Sul. Este estudo obteve resultados pouco satisfatórios, perdendo a eficiência após dois anos de sua construção. Os autores identificaram que a baixa efetividade do sistema esteve relacionada a inundações sazonais, pela composição do substrato que alimentava os biofilmes, e pela presença de aquíferos confinados a montante do sistema de tratamento.

Groudev *et al.* (2008) também avaliaram, em escala real, a efetividade de um sistema de tratamento envolvendo zonas úmidas naturais e construídas, drenos de calcário, multibarreiras reativas permeáveis e um filtro de rochas, em uma mina paralisada, na Bulgária. Estas etapas foram testadas separadamente ou em diferentes combinações. Os autores relataram alta eficiência das zonas úmidas, desde que estas tenham tamanho adequado, localização favorável em termos de geologia, hidrogeologia e clima, além da presença de espécies vegetais e microbianas adequadas ao tipo de efluente a ser tratado.

Além disso, também há boa perspectiva da utilização de multibarreiras reativas separadamente, sendo chamada atenção para a substituição dos substratos de tempos em tempos, não sendo essa periodicidade explicitamente definida no estudo. Os autores também consideram como muito eficiente a combinação das multibarreiras

permeáveis em série com zonas úmidas construídas, a partir dos percentuais de remoção que foram atingidos. Embora houvesse relevante variação sazonal, os níveis dos poluentes nos *wetlands* construídos mantiveram-se abaixo dos padrões destinados ao reuso em meio agrícola ou industrial.

O estudo de Matthies, Aplin e Jarvis (2010) utilizou dois sistemas paralelos de redução e produção de alcalinidade em uma bacia aeróbica, ao longo de cinco anos em uma mina localizada na Inglaterra. Os autores consideraram o desempenho do sistema como razoavelmente bom na remoção de ferro, alumínio e acidez, em função das taxas de remoção obtidas e comparadas aos critérios de dimensionamento da literatura para sistemas semelhantes. Foi relatado que o substrato deve ser periodicamente substituído, a partir do momento em que o pH não seja suficientemente tamponado, ocasionando a redissolução dos metais precipitados. A influência da sazonalidade foi um dos fatores limitantes no desempenho do sistema, principalmente em relação ao manganês como carbonato, pois foi observado que este elemento, que sofre remobilização sazonal, devendo ser confirmada a sua remoção, conforme sugerem os autores.

Underwood, Kruse e Bowman (2014) avaliaram um sistema de tratamento já operante em uma bacia hidrográfica afetada pela DAM, em Ohio, nos Estados Unidos da América, sendo este sistema composto pelas etapas de canal aberto de calcário, leito de escória de aço, leito de lixiviação de calcário, lagoas sucessivas de produção de alcalinidade e outros métodos não mencionados. De acordo com os autores, as análises biológicas e físico-químicas avaliadas no estudo indicaram melhora significativa da qualidade da água e das comunidades de peixes e invertebrados nas águas da bacia em estudo desde o início do tratamento.

O último estudo relacionado aos *wetlands* construídos para tratamento de efluentes de DAM, desenvolvido por Jordan, Redington e Holland (2021), envolveu uma avaliação em escala piloto de implementação de uma zona úmida com substrato de cogumelo para tratar um efluente de DAM gerado em laboratório, na Irlanda. Os autores consideraram que a zona úmida obteve alta eficiência de remoção, removendo satisfatoriamente os metais dissolvidos presentes na DAM, como alumínio, zinco, cobre, ferro e chumbo. Entretanto, o efluente de saída indicou altas

concentrações de amônia, o que seria um fator limitante para a implementação deste método em larga escala. Os autores recomendam o uso adicional de um *wetland* construído de fluxo vertical para que a amônia possa ser devidamente removida.

Shim *et al.* (2015) investigaram a eficiência da adição contínua de calcário em cursos d'água com constante geração de DAM nos entornos de minas de carvão na Coreia do Sul. Os autores discutem que a quantidade de calcário utilizada foi abaixo do ideal em relação ao desempenho obtido, muito provavelmente em função do tipo de calcário utilizado e a fração aplicada. O estudo sugere que métodos alternativos de tratamento sejam empregados, visando maior eficiência no tratamento do efluente. Os métodos alternativos não foram discutidos com profundidade pelos autores. Os autores reportam que é pouco provável que as reduções nas concentrações de metais e íons a longo prazo estejam relacionadas aos eventos de chuvas sazonais.

Outros estudos selecionados que envolveram métodos de tratamento passivo de DAM em longo prazo foram direcionados para estações de tratamento, como Hamilton *et al.* (1999) e Orden *et al.* (2021), sendo o primeiro em escala piloto e o segundo em escala real. O sistema de tratamento estudado por Hamilton *et al.* (1999) era composto por mantas de caniço, células anaeróbicas e filtros anaeróbios de rocha e foi implementado na Inglaterra. Houve remoção satisfatória de ferro, arsênio, sulfato, zinco, cádmio e cobre, porém algumas limitações foram observadas, como o curto-circuito gerado pelo caminho preferencial adotado pela água nas células aeróbias.

Orden *et al.* (2021) definem a pesquisa por eles realizada como o primeiro caso relatado na literatura, em todo o mundo, da eficiência da aplicação de substrato alcalino disperso em longo prazo, sendo o estudo implementado na Espanha. Segundo relatam os autores, ao longo da operação do sistema, em média, foram removidas 99% das concentrações de alumínio, cobre, cromo, vanádio, cobalto, zinco, e chumbo, além de 97% de remoção de níquel e urânio, de forma que a maioria dos parâmetros monitorados na saída do sistema atenderam aos padrões de qualidade da água utilizado para fins de comparação. O trabalho deu ênfase aos elementos ferro, manganês e sulfato, que não resultaram em valores finais satisfatórios quanto esperado, permanecendo acima dos limites de qualidade de instituições como *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) para águas com fins de

irrigação, Organização Mundial de Saúde (OMS), para fins de consumo humano e *Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQGs)*, também para consumo humano.

Quanto aos métodos de tratamento ativos em longo prazo, Lee *et al.* (2022) aplicaram, em escala de laboratório, uma metodologia envolvendo reatores de difusão alcalina por meios porosos de cerâmica. O diferencial deste estudo envolve o fato de que o sistema pode operar sem eletricidade por até um ano, e os autores reforçam que ele pode ser eficiente e bem empregado em situações nas quais o sistema passivo por si só não é suficiente.

Um sistema misto de tratamento passivo/biológico foi desenvolvido em escala real por Crafton *et al.* (2019), sendo utilizado um *pond* de estabilização, uma lagoa anaeróbia e um leito de calcário para tratar o efluente ácido de uma mina de carvão no leste de Ohio, nos Estados Unidos da América. Os autores consideram que o sistema operou bem durante 13 anos e que seu uso ao longo de décadas pode ser promissor, ao passo que ainda não pode ser afirmado se o sistema permanecerá eficiente durante as centenas de anos que a DAM pode permanecer em uma região de minas abandonadas.

Buscando uma abordagem mais ampla do que esta sessão já discutiu, foi possível perceber a partir da contabilização de estudos direcionados para a DAM em minas de carvão, que este tipo de extração foi o maior alvo dos pesquisadores. Isso se deve ao fato de que a indústria de carvão representa, ao redor do mundo, uma fonte de geração de energia, sendo um elemento capaz de movimentar e dominar o mercado no âmbito mundial. Há ainda uma problemática relacionada à dominância do carvão amplamente utilizado no mundo, visto que já está sendo estudada a sua influência regional e global nos créditos de carbono e enxofre (RAYMOND; OH, 2009; ACHARYA; KHAREL, 2020).

Além do carvão, as minerações de cobre, ouro, chumbo, zinco e pirita também representam uma parcela considerável da abrangência dos estudos voltados para o tratamento de DAM em longo prazo, no contexto temporal avaliado, o que é esperado tendo em vista que este impacto é originário da extração de metais sulfetados.

Ainda trazendo uma análise das métricas aqui apresentadas, identificou-se que a DAM é um problema que vem sendo estudado há muitas décadas, e os principais esforços dos pesquisadores para a solução deste problema foram voltados para o estudo e evolução das tecnologias de tratamento passivo. De acordo com os estudos analisados com efetividade em longo prazo, a utilização de áreas alagadas, naturais ou construídas, algumas vezes em conjunto com outros sistemas passivos, vem sendo empregadas ao longo dos anos, revelando-se uma excelente opção para a remediação de efluentes ácidos de minas.

Como já foi anteriormente citado, o uso de métodos de tratamento passivos indica, assim como os demais, vantagens e desvantagens. No entanto, diante dos resultados obtidos em longo prazo nos estudos prévios, e considerando que, se bem dimensionada, uma estação de tratamento passivo pode funcionar durante décadas com baixa necessidade de manutenção, esta alternativa pode, de fato, tornar-se atrativa para as empresas de mineração.

Ainda, visando que uma orientação mais clara possa ser investigada, alguns fatores precisam ser avaliados, como as principais características comuns entre os efluentes de drenagem ácida de mina. Os próximos capítulos dessa pesquisa irão abordar mais a fundo estes temas.

6.2 Caracterização dos efluentes de DAM e comparação com as legislações

Considerando os critérios de seleção de estudos para comporem a etapa de caracterização do efluente, conforme descrito na metodologia, a Tabela 7 indica quais estudos foram selecionados, os autores, o ano de publicação, o tipo de minério extraído e o país em que o estudo foi executado.

Tabela 7 – Estudos Selecionados para a Caracterização dos Efluentes de DAM.

Nome do Artigo	Autor(es)	Ano	Minério	País
Passive Treatment of Acidic Coal Mine Drainage: The Anna S Mine Passive Treatment Complex	Hedin <i>et al.</i>	2010	Carvão	Estados Unidos
Lime Treatment of Mine Drainage at the Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine, Iran	Khorasanipour; Moore; Naseh	2011	Cobre	Iran
Bench-scale study of active mine water treatment using cement kiln dust (CKD) as a neutralization agent	Mackie; Walsh	2012	Chumbo e Zinco	Canadá

Nome do Artigo	Autor(es)	Ano	Minério	País
A continuous pilot-scale system using coal-mine drainage sludge to treat acid mine drainage contaminated with high concentrations of Pb, Zn, and other heavy metals	Cui <i>et al.</i>	2012	Chumbo e Zinco	Coreia do Sul
Manganese and trace element removal from New Zealand coal mine drainage using limestone leaching beds	Christenson <i>et al.</i>	2017	Carvão	Nova Zelândia
Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa	Masindi <i>et al.</i>	2018	Carvão	África do Sul
Removal of Acidity and Metals from Acid Mine Drainage-Impacted Water using Industrial Byproducts	RoyChowdhury; Sarkar; Datta	2019	Carvão	Estados Unidos
Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems	Torres <i>et al.</i>	2018	Sulfureto	Espanha
Acid drainage neutralization and trace metals removal by a two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico	Jallath <i>et al.</i>	2018	Minério de sulfeto maciço	México
Tratamento de efluentes ácidos para a remoção do manganês e de metais pesados associados aos efluentes da mineração de carvão por meio dos processos de floculação e flotação por ar dissolvido	Volpato <i>et al.</i>	2019	Carvão mineral	Brasil
Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area	Qin <i>et al.</i>	2019	Ferro	China
Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (<i>Chrysopogon zizanioides</i>): A multiscale long-term study	Kiiskila <i>et al.</i>	2019	Carvão	Estados Unidos
Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings	Rey <i>et al.</i>	2021	Ouro	Colômbia
Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration	Orden <i>et al.</i>	2021	Pirita	Espanha
Passive co-treatment of phosphorus-depleted municipal wastewater with acid mine drainage: Towards sustainable wastewater management systems	Masindi; Shabalala; Foteinis	2022	Carvão	África do Sul
Effective treatment of real acid mine drainage using MgO-metakaolinite nanocomposite	Mothetha <i>et al.</i>	2023	Carvão	África do Sul
Laboratory simulation of the swampy forest system for the passive treatment of acid mine drainage in coal mine reclamation areas	Noor <i>et al.</i>	2023	Carvão	Indonésia

Fonte: Autora (2023).

Para cada um dos estudos selecionados, a Tabela 8 indica quais parâmetros foram analisados pelos autores.

Tabela 8 – Parâmetros Analisados nos Estudos Selecionados.

Nome do Artigo	Autor(es)	Parâmetros efluente bruto
Passive Treatment of Acidic Coal Mine Drainage: The Anna S Mine Passive Treatment Complex	Hedin <i>et al.</i>	Acidez, alumínio, ferro, manganês, pH, sulfato
Lime Treatment of Mine Drainage at the Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine, Iran	Khorasanipour; Moore; Naseh	Alumínio, antimônio, arsênio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro níquel, pH, selênio, urânio, zinco
Bench-scale study of active mine water treatment using cement kiln dust (CKD) as a neutralization agent	Mackie; Walsh	Alumínio, cálcio, chumbo, cobre, enxofre, magnésio, manganês, potássio, sódio
A continuous pilot-scale system using coal-mine drainage sludge to treat acid mine drainage contaminated with high concentrations of Pb, Zn, and other heavy metals	Cui <i>et al.</i>	Cádmio, cobre, chumbo, ferro, zinco
Manganese and trace element removal from New Zealand coal mine drainage using limestone leaching beds	Christenson <i>et al.</i>	Alcalinidade, alumínio, manganês, níquel, oxigênio dissolvido, pH, zinco
Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa	Masindi <i>et al.</i>	Acidez, alcalinidade, alumínio, cálcio, condutividade elétrica, dureza total, ferro, magnésio, manganês, pH, sólidos dissolvidos totais, sódio, sulfato
Removal of Acidity and Metals from Acid Mine Drainage-Impacted Water using Industrial Byproducts	RoyChowdhury; Sarkar; Datta	Arsênio, cádmio, chumbo, cobre, condutividade elétrica, cromo, ferro, manganês, níquel, pH, sulfato, zinco
Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems	Torres <i>et al.</i>	Alcalinidade, alumínio, arsênio, bário, cálcio, cádmio, cobalto, cobre, condutividade elétrica, ferro, magnésio, manganês, níquel, pH, potencial redox, potássio, sódio, sulfato, tálio, zinco
Acid drainage neutralization and trace metals removal by a two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico	Jallath <i>et al.</i>	Alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, cloro, cobalto, cobre, condutividade elétrica, ferro, flúor, magnésio, manganês, níquel, pH, potássio, silício, sódio, sulfato, zinco
Tratamento de efluentes ácidos para a remoção do manganês e de metais pesados associados aos efluentes da mineração de carvão por meio dos processos de floculação e flotação por ar dissolvido	Volpato <i>et al.</i>	Alumínio, ferro, manganês, pH, zinco
Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area	Qin <i>et al.</i>	Arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, níquel, zinco
Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (<i>Chrysopogon zizanioides</i>): A multiscale long-term study	Kiikskila <i>et al.</i>	Alumínio, cromo, chumbo, ferro, manganês, níquel, zinco

Nome do Artigo	Autor(es)	Parâmetros efluente bruto
Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings	Rey <i>et al.</i>	Alcalinidade, cianeto, chumbo, cloreto, cobre, ferro, mercúrio, nitrato, nitrito, ortofosfato, oxigênio dissolvido, pH, prata, sulfato, sulfeto, zinco, níquel
Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration	Orden <i>et al.</i>	Alumínio, antimônio, arsênio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, lítio, molibdênio, níquel, selênio, tálio, urânio, vanádio, zinco
Passive co-treatment of phosphorus-depleted municipal wastewater with acid mine drainage: Towards sustainable wastewater management systems	Masindi; Shabalala; Foteinis	Alumínio, arsênio, cálcio, cobre, cromo, condutividade elétrica, ferro, magnésio, manganês, níquel, ortofosfato, pH, chumbo, sulfato, zinco
Effective treatment of real acid mine drainage using MgO-metakaolinite nanocomposite	Mothetha <i>et al.</i>	Alumínio, cálcio, chumbo, condutividade elétrica, cobre, cromo, ferro, magnésio, manganês, níquel, pH, sulfato, zinco
Laboratory simulation of the swampy forest system for the passive treatment of acid mine drainage in coal mine reclamation areas	Noor <i>et al.</i>	Cádmio, ferro, manganês, pH, sólidos suspensos totais

Fonte: Autora (2023).

Ao todo, foram escolhidos dezenove parâmetros para comporem a lista de variáveis que foram analisadas de maneira mais profunda. A escolha se deu a partir da frequência de ocorrência de um determinado parâmetro dentro dos dezessete estudos selecionados para essa análise. O parâmetro mais frequente foi o ferro, constando em quatorze dentre os dezessete estudos. A Tabela 9 indica o resumo de todos os elementos e parâmetros abordados nos estudos selecionados, bem como o número de vezes que cada um foi utilizado pelos autores nos respectivos estudos.

Tabela 9 – Parâmetros Utilizados nos Estudos Selecionados e Frequência de Ocorrência

Parâmetro	Número de Ocorrências	Parâmetro	Número de Ocorrências
Ferro	14	Selênio	2
Zinco	13	Tálio	2
Alumínio	12	Urânio	2
Manganês	12	Bário	1
pH	12	Cianeto	1
Chumbo	11	Cloreto	1

Cobre	11	Cloro	1
Níquel	11	Dureza	1
Cádmio	8	Enxofre	1
Sulfato	8	Flúor	1
Arsênio	7	Lítio	1
Cromo	7	Molibdênio	1
Condutividade elétrica	6	Nitrato	1
Magnésio	6	Nitrito	1
Cálcio	5	Potencial redox	1
Alcalinidade	4	Prata	1
Cobalto	4	Sólidos dissolvidos totais	1
Sódio	4	Silício	1
Potássio	3	Sólidos suspensos totais	1
Acidez	2	Sulfeto	1
Antimônio	2	Vanádio	1
Ortofosfato	2	Mercúrio	1
Oxigênio dissolvido	2		

Fonte: Autora (2023).

Diante da análise do conteúdo da Tabela 9, foram determinados os elementos que caracterizam a DAM de modo geral, para efluentes de mineração de metais sulfetados, considerando as frequências de ocorrência de quatorze (valor máximo) até três (valor mínimo) vezes. Tal determinação se deu pelo fato de que os elementos citados uma ou duas vezes foram utilizados de maneira muito específica em algum estudo, não podendo desse modo ser analisado como um parâmetro que atende ao objetivo da análise no presente trabalho, que envolve registrar concentrações e características gerais de efluentes de DAM.

Logo, os dezenove parâmetros selecionados para a etapa de caracterização do efluente foram: alcalinidade, alumínio, arsênio, cálcio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, condutividade elétrica, cromo, ferro, magnésio, manganês, níquel, pH, potássio, sódio, sulfato e zinco.

Considerando a baixa frequência de utilização de alguns parâmetros nos estudos selecionados, foram excluídos da análise os seguintes: acidez, antimônio, bário, cianeto, cloro, cloreto, dureza, enxofre, flúor, lítio, mercúrio, molibdênio, nitrato, nitrito, ortofosfato, oxigênio dissolvido, potencial redox, prata, selênio, silício, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais, sulfeto, tálio, urânio e vanádio. Apesar de

o parâmetro acidez representar uma condição importante para o tipo de efluente estudado, ele foi excluído considerando que o pH já representa a condição de acidez.

O intuito de realizar a triagem dos parâmetros de qualidade foi auxiliar no entendimento de quais métodos são mais eficazes para o tratamento da DAM considerando um cenário de pós-fechamento da mina. Essa seleção poderá auxiliar estudos futuros na escolha de métodos que sejam eficazes para uma maior gama de tipos de efluentes, levando em consideração a grande variedade de minerais extraídos capazes de gerar efluentes ácidos.

Após a seleção de parâmetros mais citados nos estudos selecionados, foi elaborada a Tabela 10, que indica as faixas de variação entre os parâmetros analisados nos efluentes de entrada, de maneira a caracterizar o efluente de DAM, mostrando os valores médios para cada parâmetro e respectivas medianas. Destaca-se que foram utilizados apenas os resultados de monitoramento quantificáveis, ou seja, medidas inferiores aos limites de detecção foram desconsideradas da presente análise. Para facilitar a visualização, os dados foram plotados em gráficos *box-plot*, que podem ser visualizados entre as Figura 6 e Figura 23.

Tabela 10 – Faixas de Variação, Média e Mediana dos Parâmetros Selecionados na Entrada dos Sistemas de Tratamento

Parâmetro	Unidade	Varição Entrada	Média Entrada	Mediana Entrada
Alcalinidade	mg/L de CaCO ₃	0 - 7,76	1,09	0,00
Alumínio	mg/L	0,0703 - 500	72,43	38,69
Arsênio	mg/L	0,0011 - 4,01	1,12	0,30
Cálcio	mg/L	125 – 576	341,33	359,50
Cádmio	mg/L	0,00719 - 5,8	1,18	0,21
Chumbo	mg/L	0,0007 - 8,2	0,95	0,09
Cobalto	mg/L	0,02 - 11,59	1,43	0,23
Cobre	mg/L	0,09687 - 25,5	5,48	3,20
Condutividade elétrica	µS/cm	1,87 – 2719	564,27	9,67
Cromo	mg/L	0,0005 - 1,04	0,23	0,03
Ferro	mg/L	0,044 - 8000	586,59	37,00
Magnésio	mg/L	1,35 - 1759,4	525,67	180,00
Manganês	mg/L	0,0219 - 140	34,05	10,55
Níquel	mg/L	0,005 – 96	5,71	0,71
pH	-	2 - 6,5	3,06	2,80
Potássio	mg/L	1 – 15	8,00	8,00
Sódio	mg/L	14 – 2550	632,06	291,09

Sulfato	mg/L	150 – 30000	7981,05	2884,09
Zinco	mg/L	0,134 - 1372	147,58	14,00

Fonte: Autora (2023).

Figura 6: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Alcalinidade na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

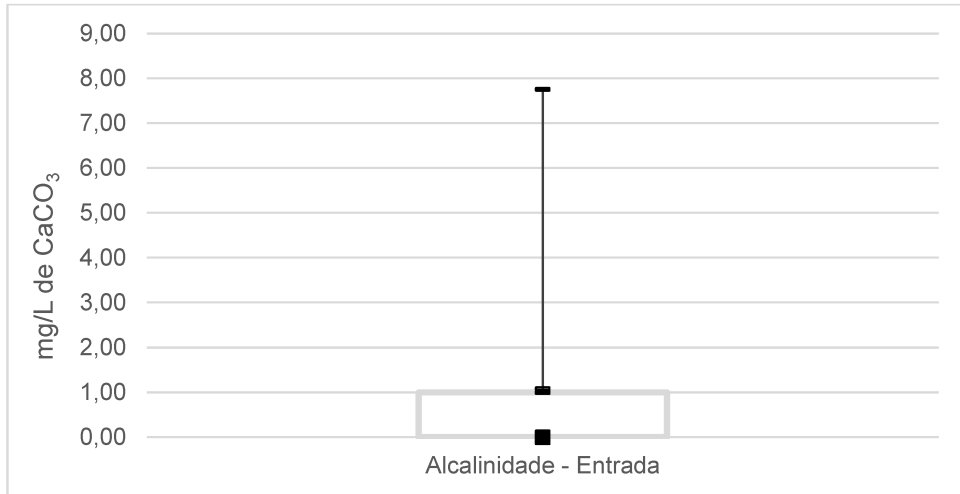


Figura 7: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Arsênio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

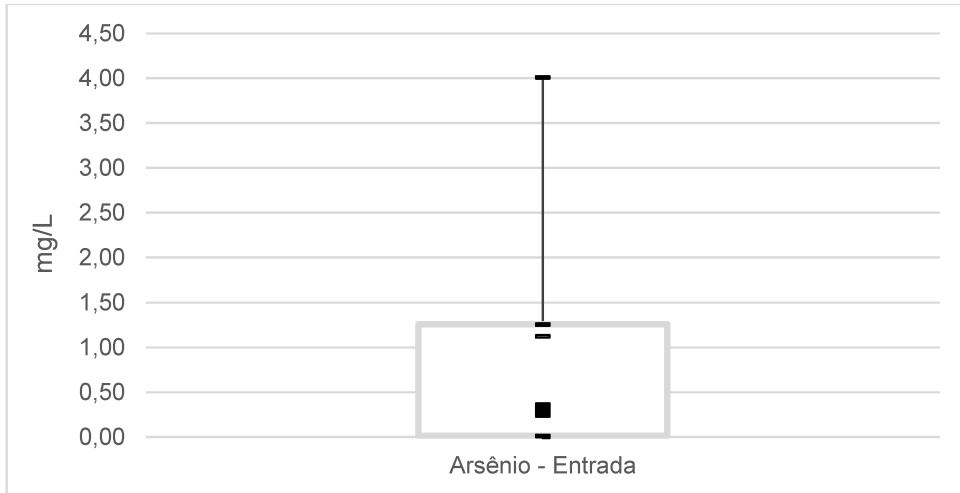


Figura 8: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Cálcio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

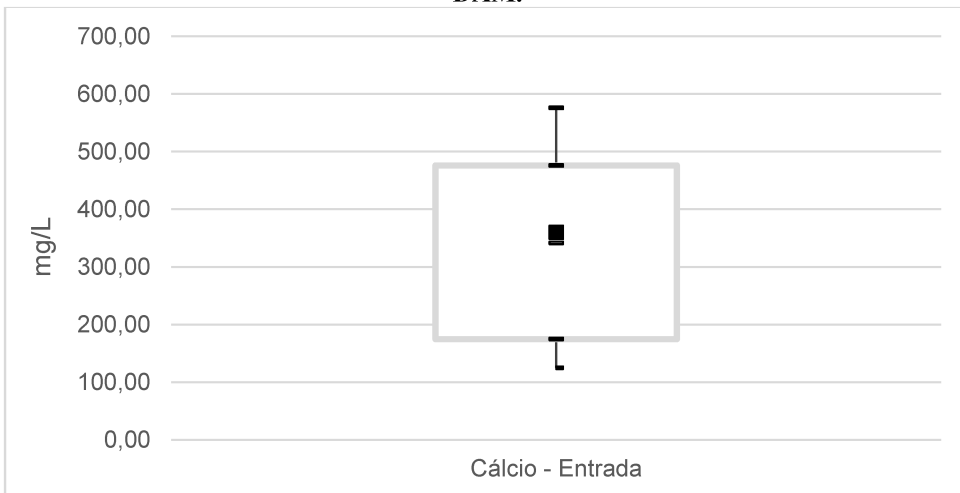


Figura 9: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Cádmiu na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

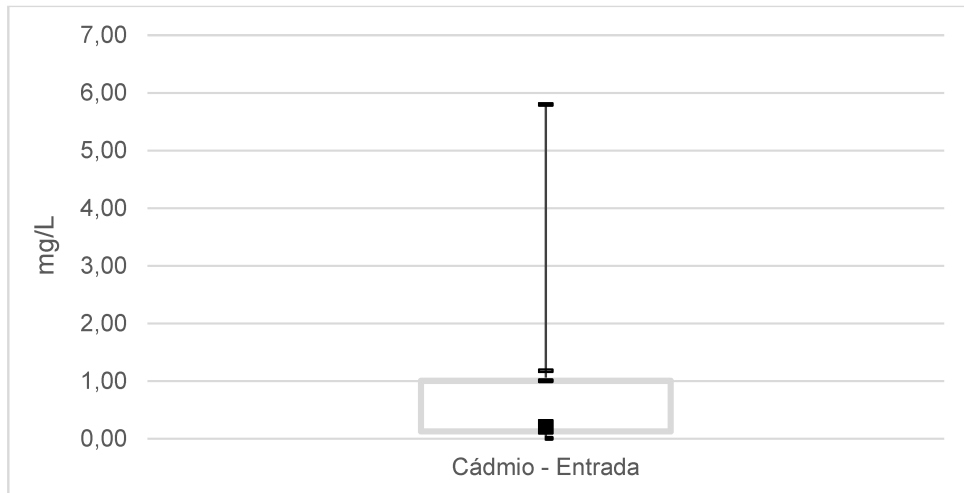


Figura 10: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Chumbo na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

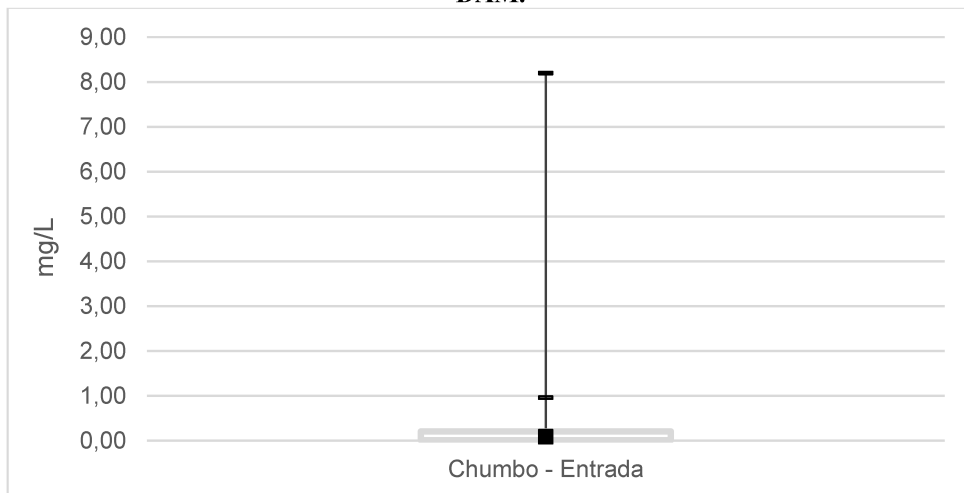


Figura 11: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Cobalto na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

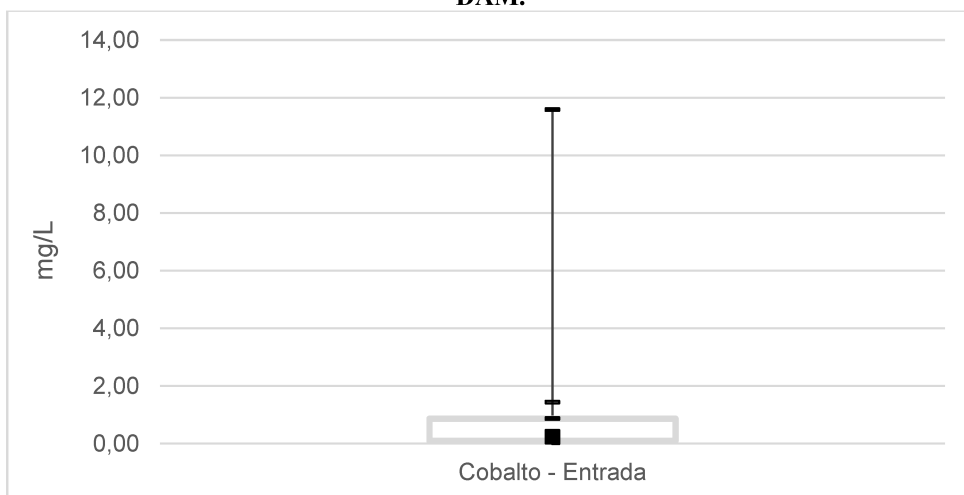


Figura 12: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Cobre na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

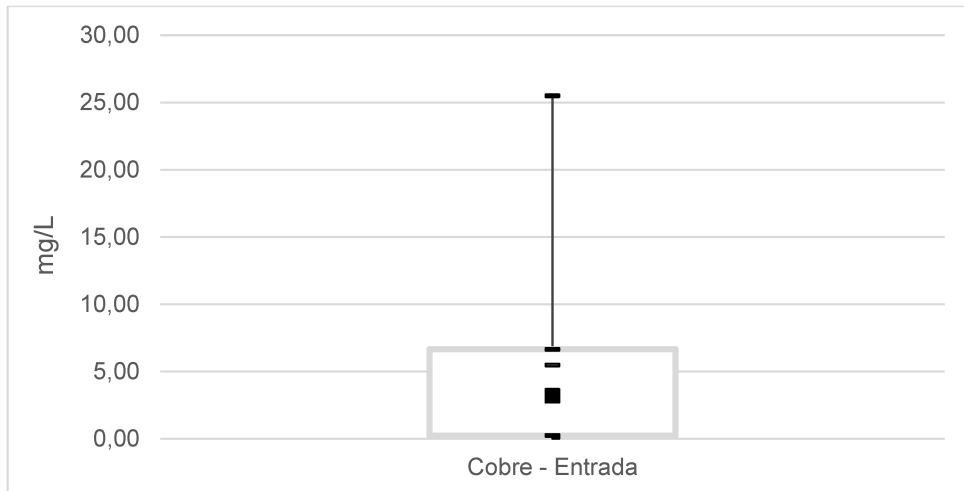


Figura 13: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Condutividade Elétrica na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

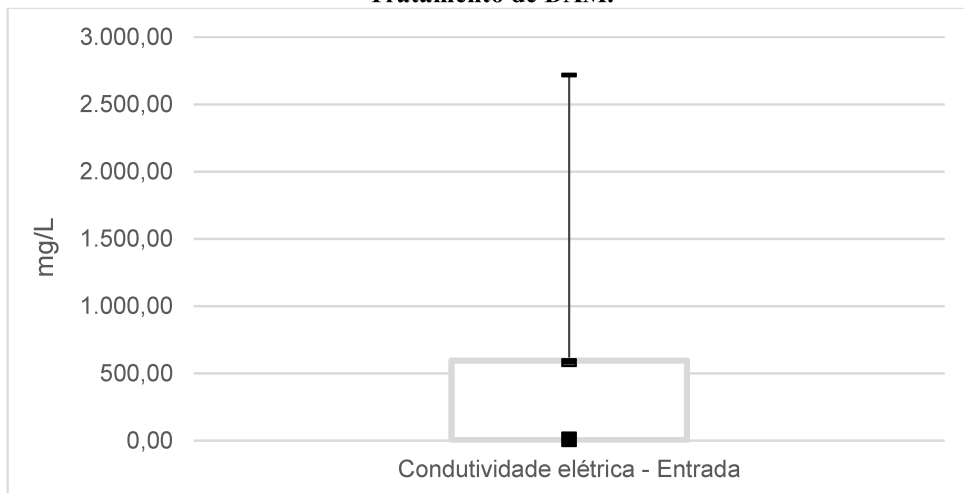


Figura 14: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Cromo na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

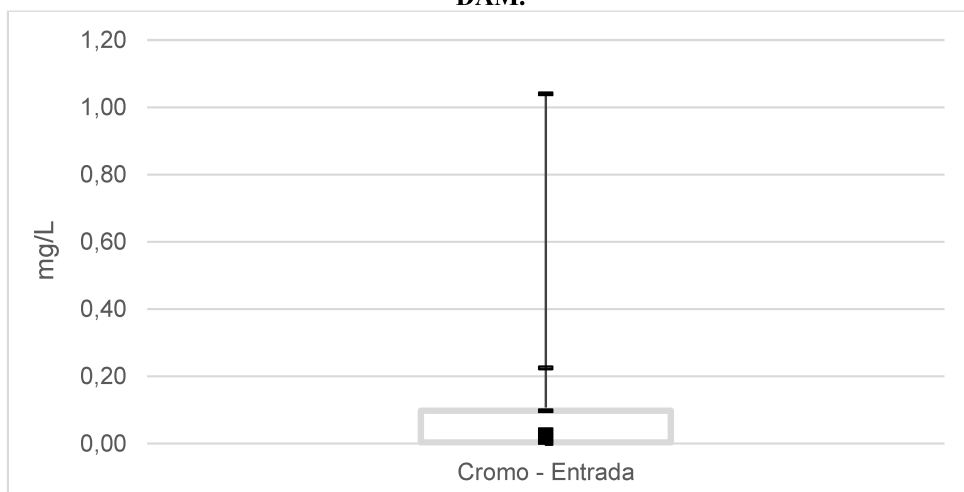


Figura 15: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Ferro na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

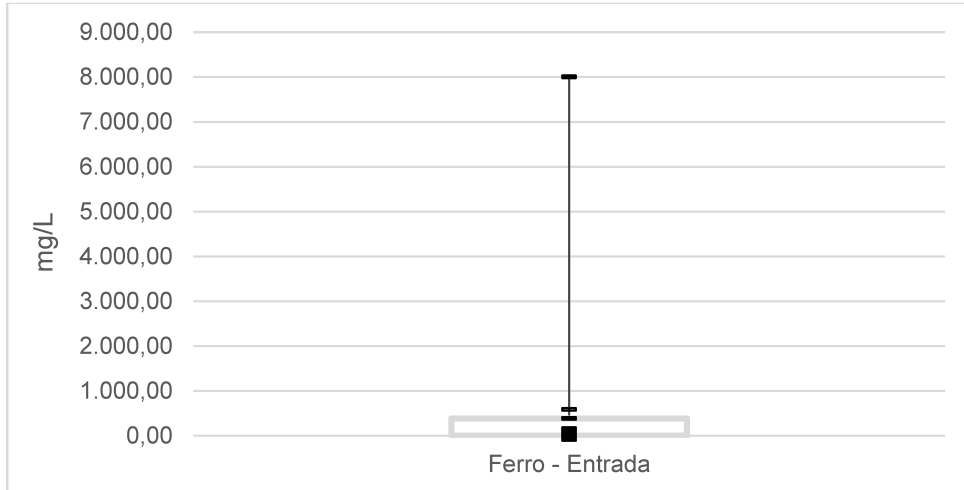


Figura 16: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Magnésio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

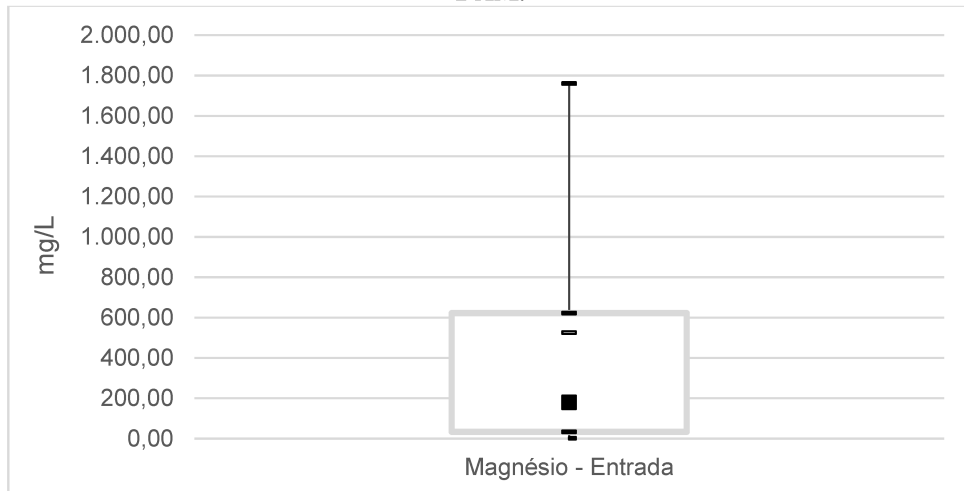


Figura 17: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Manganês na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

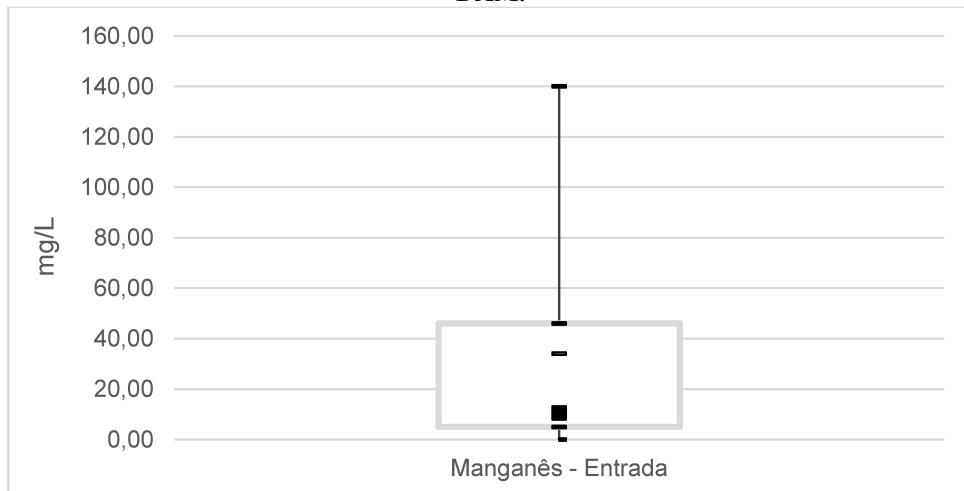


Figura 18: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Níquel na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

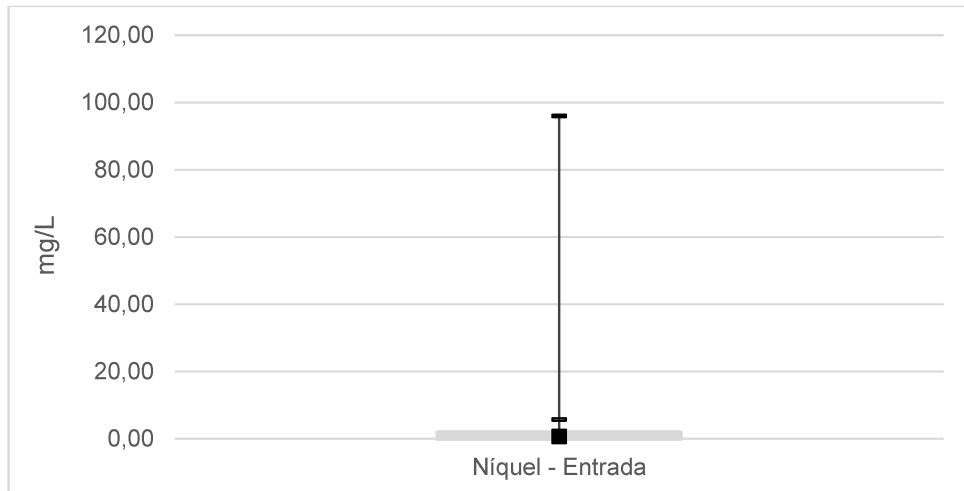


Figura 19: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de pH na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

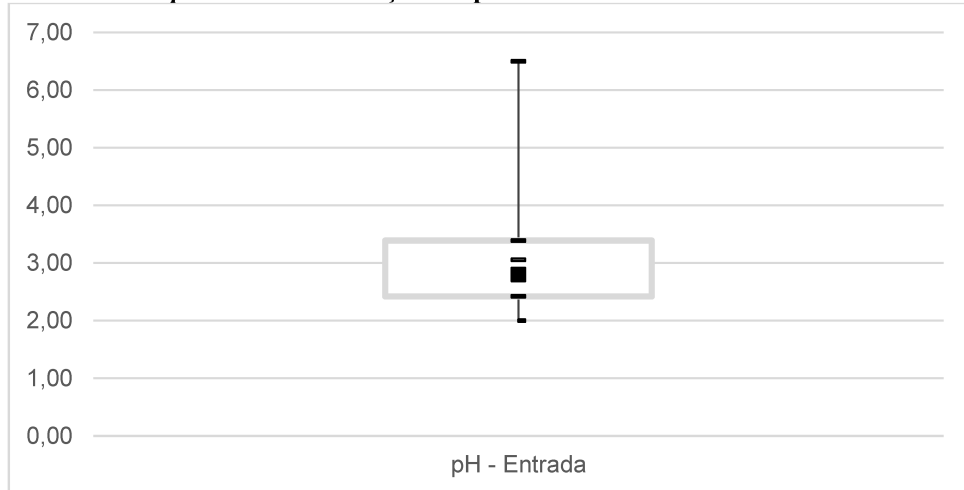


Figura 20: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Potássio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

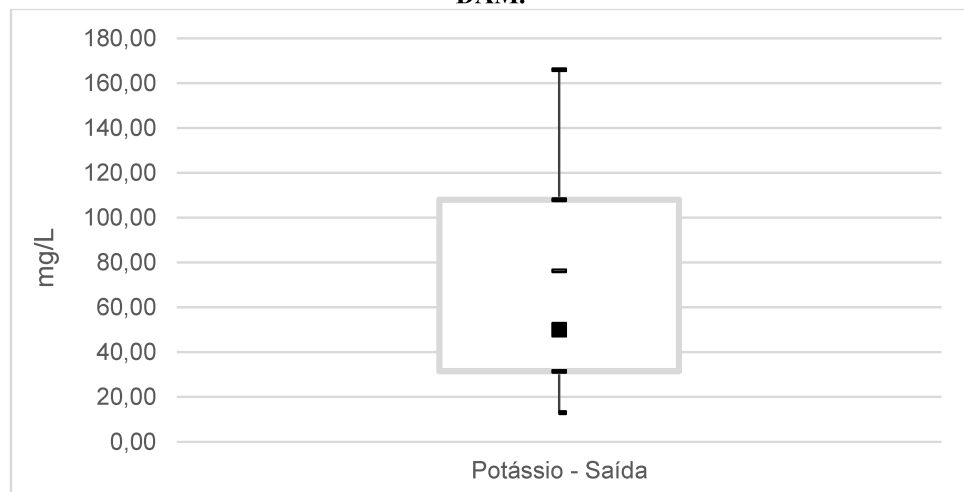


Figura 21: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Sódio na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

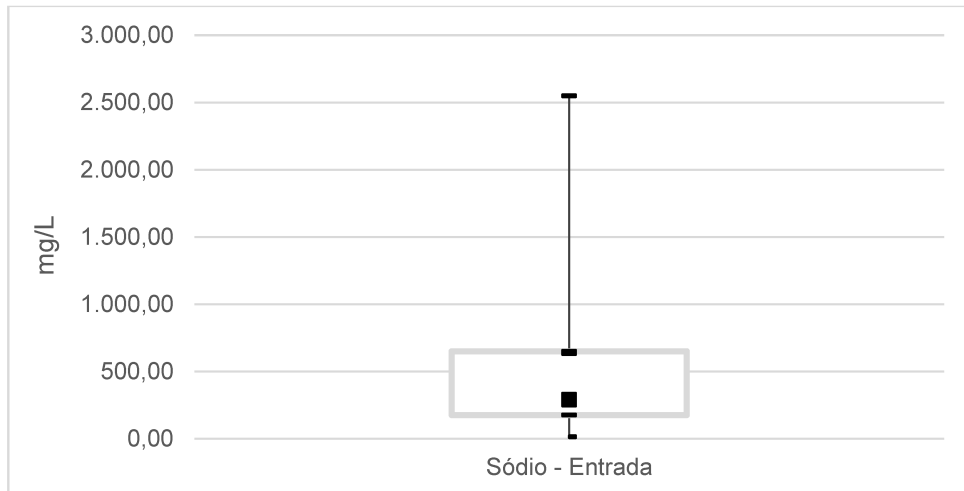


Figura 22: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Sulfato na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.

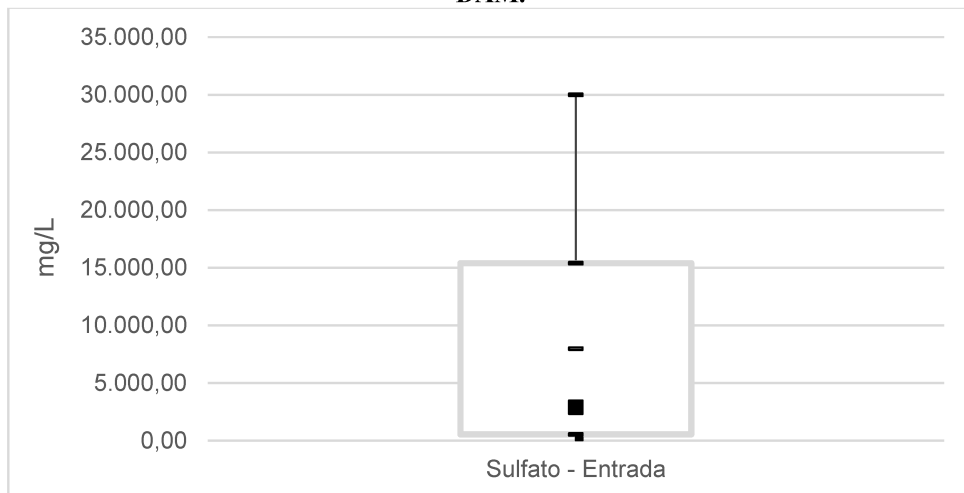
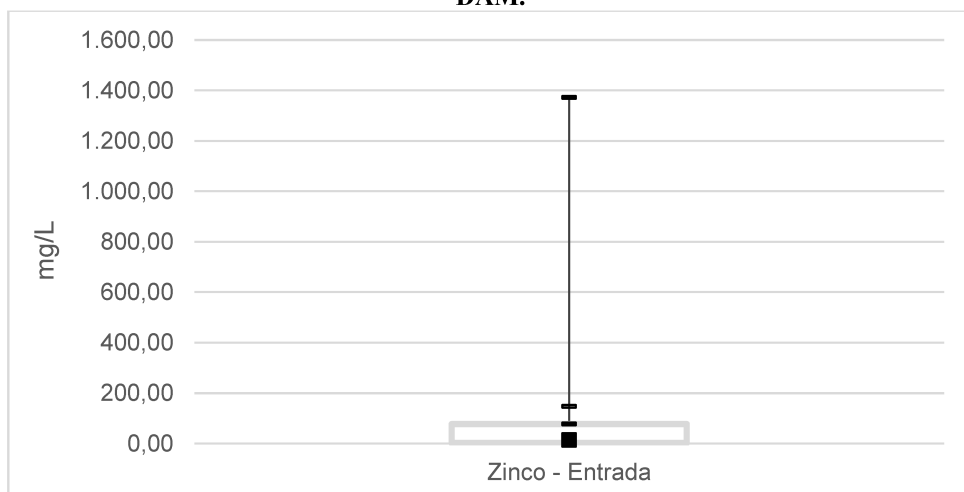


Figura 23: Gráfico *Box-plot* das Concentrações de Zinco na Entrada dos Sistemas de Tratamento de DAM.



Uma vez que as características dos efluentes foram compreendidas, a etapa seguinte consistiu na comparação entre os valores de saída dos sistemas de tratamento de DAM e os padrões de lançamento de efluentes anteriormente mencionados.

Conforme descrito na metodologia, cada parâmetro foi analisado individualmente. Em virtude da variabilidade das concentrações de cada estudo, similarmente à etapa de caracterização, foi considerada na análise apenas as medidas máximas e mínimas. Além disso, somente os parâmetros que possuem padrão de lançamento para pelo menos uma das legislações consideradas foram analisados nessa etapa. A Tabela 11 representa as faixas de variação, e os valores médios e medianos para cada parâmetro, na saída dos sistemas. Já a Tabela 12 indica as legislações utilizadas para fins de comparação e seus respectivos limites, para cada parâmetro.

Além disso, também foram avaliados os percentuais de remoção por tipo de método adotado, para cada elemento estudado, de forma a entender quais métodos foram mais eficientes na remoção dos elementos e no respectivo atendimento às normas.

Tabela 11 – Faixas de Variação, Média e Mediana dos Parâmetros Selecionados na Saída dos Sistemas de Tratamento

Parâmetro	Unidade	Variação Saída	Média Saída	Mediana Saída
Alcalinidade	mg/L de CaCO ₃	0,099 - 726	183,15	135,00
Alumínio	mg/L	0,005 – 3,60	0,64	0,19
Arsênio	mg/L	0,0013 - 0,081	0,03	0,01
Cálcio	mg/L	81 - 1515,8	613,35	555,00
Cádmio	mg/L	0,0002 - 0,181	0,06	0,02
Chumbo	mg/L	0,0002 - 0,22	0,09	0,05
Cobalto	mg/L	0,0002 - 1,043	0,15	0,00
Cobre	mg/L	0,02 - 0,1	0,05	0,04
Condutividade elétrica	µS/cm	1,05 - 2100	447,14	137,15
Cromo	mg/L	0,0001 - 0,0463	0,02	0,01
Ferro	mg/L	0,024 - 64,8	7,38	0,36
Magnésio	mg/L	0,5 – 7798	1927,88	109,50
Manganês	mg/L	0,00333 - 8,3	2,54	2,25
Níquel	mg/L	0,003 - 0,61	0,17	0,02
pH	-	6,14 - 10,5	7,61	7,40
Potássio	mg/L	13 – 166	76,33	50,00
Sódio	mg/L	15 – 953	568,80	918,00
Sulfato	mg/L	22 – 7500	1480,99	1072,40
Zinco	mg/L	0,003 - 39,377	2,73	0,07

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 – Padrões de Lançamento de Efluentes Nacionais e Internacionais

Parâmetro	Unidade	DN Copam CERH nº 08/2022 Minas Gerais Lançamento de efluentes	Res. Conama nº 430/2011 Brasil Lançamento de efluentes	Decreto nº 90/2001 Chile Lançamento de efluentes em corpos d'água fluviais	CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery - nº 437.14
Alcalinidade	mg/L de CaCO ₃	-	-	-	-
Alumínio	mg/L	-	-	5	-
Arsênio	mg/L	0,2	0,5	0,5	0,0993
Cálcio	mg/L	-	-	-	-
Cádmio	mg/L	0,1	0,2	0,01	0,782
Chumbo	mg/L	0,1	0,5	0,05	1,32
Cobalto	mg/L	-	-	-	0,182
Cobre	mg/L	1	1	1	0,659
Condutividade elétrica	µS/cm	-	-	-	-
Cromo	mg/L	0,1	0,1	0,05	-
Ferro	mg/L	15	15	5	-
Magnésio	mg/L	-	-	-	-
Manganês	mg/L	1	1	0,3	-
Níquel	mg/L	1	2	0,2	0,794
pH	-	5 - 9	5 - 9	6 - 8,5	6 - 9
Potássio	mg/L	-	-	-	-
Sódio	mg/L	-	-	-	-
Sulfato	mg/L	-	-	1000	-
Zinco	mg/L	5	5	3	0,657

Fonte: Autora (2023).

Alumínio

O alumínio é um elemento metálico naturalmente disponibilizado na crosta terrestre, sendo liberado para o meio ambiente via processos naturais ou por interferência antrópica. Normalmente, em meio aquático, com valores de pH próximos a neutralidade, as concentrações de alumínio podem variar entre 0,001 mg/L e 0,05 mg/L. Em águas ácidas, as medidas podem se concentrar entre 0,5 mg/L e 1 mg/L. Em situações de DAM, com condições de extrema acidez, o alumínio pode atingir concentrações próximas a 90 mg/L (CETESB, 2017).

A pesquisa desenvolvida por Christenson *et al.* (2017), objetivou o tratamento de um efluente originário de uma mina de carvão na Nova Zelândia. Este estudo, por sua vez, obteve o menor resultado de medição para alumínio dentro das pesquisas selecionadas, com medida na saída do sistema igual a 0,005 mg/L, frente a um

efluente de entrada com valor registrado de 2,13 mg/L. O percentual de remoção oferecido pelo tratamento passivo utilizando processos oxidativos abióticos em leitos de lixiviação de calcário foi de 99,77%, atendendo aos padrões estabelecidos pelo Decreto chileno nº 90/2001, que delimita o limite máximo de 5 mg/L, única legislação selecionada que direciona padrão de lançamento para alumínio.

Por sua vez, Masindi, Shabalala e Foteinis (2022) obtiveram em sua pesquisa, em escala de bancada, um percentual de remoção de alumínio equivalente a 99,51%, mediante às concentrações de entrada de 740 mg/L e de saída igual a 3,6 mg/L. O método de tratamento aplicado foi o passivo, sendo desenvolvido um co-tratamento juntamente com águas residuárias municipais. O diferencial deste estudo foi que nenhuma energia ou reagente foram consumidos durante o processo de co-tratamento. Esta pesquisa também atingiu o padrão do Decreto chileno nº 90/2001.

Os percentuais de remoção para ambas as pesquisas foram próximos, e, por isso, sugerem que os métodos de tratamento passivos, de modo geral, podem ser eficientes na remoção de alumínio de efluentes ácidos.

Arsênio

O arsênio é considerado um semimetal, e, assim como o alumínio, ocorre de maneira natural na crosta terrestre. A forma mais comum de liberação deste elemento no meio é a partir do tratamento e processamento de minérios de chumbo, ouro, cobre e cobalto. O Arsênio é insolúvel em água, no entanto, seus compostos são solúveis e capazes de percolar e gerar contaminação em águas subterrâneas, ou, até mesmo, escoar para águas superficiais. Alguns fatores físico-químicos, como o pH, podem vir a elevar as concentrações de arsênio dissolvido em água (CETESB, 2017). Todas as normas aqui adotadas como padrões de comparação indicam limite máximo para arsênio para fins de lançamento de efluentes, sendo o limite da *CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery* - nº 437.14, o mais restritivo, equivalente a 0,0993 mg/L (Tabela 12).

O menor valor encontrado para arsênio dentro das pesquisas selecionadas foi identificado na pesquisa de Orden *et al.* (2021), que tratou, em escala real, efluentes ácidos originários de uma mina de pirita, na Espanha. O método de tratamento passivo

empregado pelos autores consistiu na implementação de uma estação de tratamento passiva, que utilizou substrato alcalino disperso (SAD). Entende-se por SAD, uma tecnologia de tratamento em multietapas, composto por lagoas oxidantes de ferro naturais, reatores calcários e ou reatores. Este tratamento a longo prazo ofereceu uma remoção de arsênio próxima a 100%, considerando concentração de entrada igual a 0,3011 mg/L, frente à uma concentração de saída equivalente a 0,0013 mg/L. Este sistema ofereceu um efluente de saída com concentração satisfatória considerando os padrões aqui adotados como comparativos.

A pesquisa desenvolvida por RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) representou a maior concentração de arsênio, dentro da totalidade de estudos selecionados para os efluentes de saída dos sistemas de tratamento de DAM. A referida concentração registrada foi de 0,081 mg/L, atendendo a todos os padrões considerados na presente pesquisa (Tabela 12). O percentual de remoção de arsênio foi de 98%, visto que a concentração na entrada do sistema foi de 3,99 mg/L. O efluente tratado pelos autores era originário de uma mina de carvão, nos Estados Unidos da América, e o método passivo adotado consistiu em um meio filtrante de fluxo de gravidade baseado em resíduo de tratamento de água potável, aplicado em escala laboratorial.

Apesar de o percentual de remoção de arsênio na pesquisa de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) ter sido levemente maior do que o encontrado pelo estudo desenvolvido por Orden *et al.* (2021), ambos os tratamentos oferecerem concentrações em acordo com as normas adotadas como meio de comparação na presente pesquisa. É notório que o efluente originário da mina de carvão, da segunda pesquisa mencionada, possuía concentrações mais elevadas de arsênio, porém o tratamento foi efetivo na remoção deste elemento.

Cádmio

O Decreto chileno nº 90/2001 apresenta a condição mais restritiva de lançamento de efluentes para o elemento Cádmio dentro das normativas abordadas na presente pesquisa, indicando limite máximo de 0,01 mg/L. O cádmio não está disponível no ambiente de maneira isolada, mas sim associado a sulfetos de minérios como zinco, chumbo e cobre. A atividade de mineração é uma forma antropogênica de liberação deste elemento no meio ambiente. Pode ocorrer bioacumulação de cádmio em

invertebrados, peixes, mamíferos e plantas aquáticas, e o pH ácido auxilia na disponibilização deste metal no meio (CETESB, 2022).

Torres *et al.* (2018) implementaram, em escala de bancada, uma tecnologia passiva de tratamento de DAM baseada em sistemas de tratamento sucessivos, utilizando calcário e carbonato de bário. O percentual de remoção de cádmio obtido pelos autores foi de 50%, tendo em vista uma concentração inicial de 0,362 mg/L, seguida de uma concentração do efluente na saída do sistema igual a 0,181 mg/L, sendo essa a maior medida obtida para o efluente tratado das pesquisas selecionadas. O valor final de cádmio ultrapassou os limites determinados pela DN Copam CERH nº 08/2022, de 0,1 mg/L, e pelo Decreto chileno nº 90/2001, de 0,01 mg/L. O valor final para o efluente de saída esteve em acordo com o que determina a Resolução Conama nº 430/2011 e o *CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery* - nº 437.14 (Tabela 12).

Novamente, o estudo de Orden *et al.* (2021) indicou a menor concentração frente às demais pesquisas, dessa vez para o metal cádmio. A concentração inicial a montante do sistema de tratamento era de 0,0529 mg/L, e a concentração de cádmio no efluente já tratado foi equivalente a 0,0002 mg/L, resultando em um percentual de remoção de 99,62%. A medida final de cádmio no efluente atendeu satisfatoriamente a todas as normas utilizadas para fins de comparação no presente estudo, disponíveis na Tabela 12.

O método de tratamento aplicado por Torres *et al.* (2018) não se mostrou eficiente na remoção de cádmio do efluente ácido, enquanto a pesquisa de Orden *et al.* (2021) se mostrou muito eficiente neste propósito. É importante destacar que ambos os métodos foram passivos, e consistiram na presença de mais de um sistema em sucessão, configurando uma estação de tratamento. Nesse caso, é possível entender que as características do efluente, bem como outros fatores externos, podem interferir na eficiência do tratamento, o que fortalece o argumento de que as tecnologias devem ser dimensionadas considerando as características físicas e químicas do efluente. Considerar o clima, a topografia e a localização geográfica também é de suma importância para que o método seja efetivo, considerando uma aplicação a longo prazo.

Chumbo

O chumbo geralmente é encontrado em pequenas quantidades na crosta terrestre, e associa-se geralmente aos minérios que contém zinco, estando novamente as atividades de mineração diretamente relacionadas à facilitação da liberação de chumbo para o ambiente. Além do pH, outros fatores como o oxigênio dissolvido podem influenciar na quantidade de chumbo presente no meio (CETESB, 2022). Todas as normas representadas na Tabela 12 indicam limite máximo de chumbo para fins de lançamento de efluentes em corpos d'água.

O método de tratamento passivo empregado por RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019), anteriormente discutido, ofereceu a maior concentração de chumbo para os efluentes da saída do sistema de tratamento, dentro das pesquisas selecionadas. O referido valor alcançou a medida de 0,22 mg/L, tendo em vista uma concentração inicial de 8,2 mg/L. Apesar de o percentual de remoção do sistema ter sido igual a 97%, o efluente a jusante do tratamento esboçou concentração superior aos limites determinados pela DN Copam CERH nº 08/2022, de 0,1 mg/L, e pelo Decreto chileno nº 90/2001, de 0,05 mg/L.

A menor medida de chumbo para os efluentes tratados foi obtida por Orden *et al.* (2021), e o valor registrado foi equivalente a 0,0002 mg/L. A concentração medida na entrada do sistema foi igual a 0,0181 mg/L, resultando em um percentual de remoção de 98,9%. A concentração de chumbo após tratamento esteve em plena conformidade com os padrões máximos estabelecidos pelas normas utilizadas para fins de comparação, visualizadas na Tabela 12.

Novamente há um destaque para a eficiência do tratamento e DAM implementado por Orden *et al.* (2021), principalmente quando comparado a outros estudos que não obtiveram resultados tão satisfatórios, nesse caso, relacionados à remoção de chumbo do efluente ácido de mina.

Os efluentes tratados em ambas as pesquisas não possuíam mesma origem, sendo pirita e carvão. No caso da pesquisa desenvolvida por Orden *et al.* (2021), o sistema de tratamento foi especialmente desenvolvido para o tratamento de DAM, enquanto o estudo de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) utilizou artifícios para

aproveitamento de resíduos de tratamento de água potável. O aproveitamento de subprodutos é de fato uma metodologia que promove a sustentabilidade, porém, nesse caso, devem ser considerados aspectos como a presença de elementos no resíduo que possam ter influenciado na capacidade do sistema de remover chumbo do efluente alvo de tratamento. Logo, quando utilizadas tecnologias para aproveitamento de resíduos, é importante conhecer plenamente as características físico-químicas destes.

Cobalto

O cobalto é um elemento químico que ocorre na crosta terrestre em forma de minérios como a cobaltita, a licaeita, a esmaltita e a eritrita, em concentrações na faixa de 0,001 e 0,002%. A exposição deste metal ao meio ocorre durante o processamento de minério para obtenção de ligas metálicas, principalmente de cobre e níquel (ALVES; ROSA, 2003). Apenas o *CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery* - nº 437.14, possui limite máximo de cobalto para lançamento de efluentes, equivalente a 0,182 mg/L.

O estudo desenvolvido por Torres *et al.* (2018), já descrito nesta pesquisa, indicou a maior concentração de cobalto dentro dos estudos selecionados, e obteve um percentual de remoção de 91%. O efluente antes do tratamento indicava concentração igual a 1,339 mg/L, enquanto o valor final do efluente tratado foi equivalente a 1,043 mg/L. Apesar do elevado percentual de remoção, o efluente na saída do sistema de tratamento passivo de DAM esteve não conforme quando comparado ao limite determinado pela norma adotada.

A menor medida de cobalto na saída dos sistemas de tratamento ocorreu para o estudo de Hedin *et al.* (2010), com concentração igual a 0,0002 mg/L. Apesar desse valor atender ao padrão determinado pela norma mencionada, o percentual de remoção não pôde ser avaliado, visto que a concentração de entrada não foi medida nessa pesquisa. O sistema de tratamento aplicado pelos autores era passivo, e utilizava lagoas de fluxo vertical em um SSPA, em escala real.

A representatividade do cobalto dentro das pesquisas analisadas não trouxe contribuições relevantes como a dos demais elementos até aqui avaliados, tendo em

vista que o valor máximo encontrado esteve acima do único padrão identificado, e que o valor mínimo esteve, por sua vez, muito abaixo do referido limite, não sendo possível avaliar o percentual de remoção desse sistema. Essa condição sinaliza este elemento pode estar presentes em efluentes de DAM de maneira muito variável e precisa ser mais bem avaliado, buscando de fato entender a sua contribuição e seus efeitos no meio, uma vez lançado ao ambiente.

Cobre

O cobre é um elemento que pode ser disponibilizado ao meio por diversos fins, incluindo a mineração, o lançamento de efluentes provenientes de estações de tratamento, uso de algicidas, precipitação atmosférica de fontes industriais, ou, até mesmo, a corrosão de tubulações a partir de águas ácidas. Em águas naturais, as concentrações de cobre são, geralmente, inferiores a 20 µg/L (AZEVEDO; CHASIN, 2003).

A pesquisa de Orden *et al.* (2021) obteve o valor mínimo para cobre dentre os estudos selecionados, considerando a saída dos sistemas de tratamento. A medida registrada foi equivalente a 0,02 mg/L e esteve em conformidade com os padrões de todas as normas utilizadas para fins de comparação, conforme a Tabela 12. O percentual de remoção do sistema de tratamento de DAM, nesse caso, foi de 99,3%, frente a um valor de entrada de 14,1 mg/L.

Já o valor máximo indicado ocorreu para as pesquisas de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) e Mackie e Walsh (2012), que indicaram uma concentração de cobre na saída dos sistemas de tratamento de 0,1 mg/L. A primeira pesquisa mencionada já foi anteriormente detalhada, e a segunda utilizou de um método de tratamento passivo, a partir do pó de forno de cimento, para o tratamento de efluente ácido originário de uma mina de chumbo e zinco, no Canadá. Os percentuais de remoção foram equivalentes a 99,7% e 99,5%, com medidas de entrada dos sistemas de 6,8 mg/L e 3,95 mg/L, para os estudos de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) e Mackie e Walsh (2012), respectivamente.

As três pesquisas aqui mencionadas trataram os efluentes ácidos, de diversas fontes poluidoras diferentes, a partir dos métodos de tratamento passivos. A prevalência da

adoção de sistemas passivos já foi aqui discutida, e a sua eficiência vem sendo afirmada para a remoção de diversos elementos, incluindo o cobre. Há de se destacar que as concentrações deste elemento na entrada dos três sistemas de tratamento estavam muito acima dos limites determinados para fins de lançamento de efluentes disponíveis na Tabela 12, e que os sistemas entregaram resultados muito satisfatórios, atendendo às normativas.

Cada um dos estudos adotou métodos diferentes, e a pesquisa de Orden *et al.* (2021) se destaca frente às demais, pois, além de ter sido desenvolvida em escala real, em uma mina abandonada o tratamento foi avaliado ao longo de 28 meses, e, segundo os autores, foi uma abordagem econômica e efetiva para o tratamento de DAM.

Cromo

O elemento cromo conta com padrões de lançamento determinados pelas normativas DN Copam CERH nº 08/2022, Resolução Conama nº 430/2011 e Decreto nº 90/2001, sendo os limites máximos de 0,1 mg/L, para as duas primeiras, e 0,05 para a última mencionada.

De acordo com a CETESB (2017) o cromo em sua forma metálica não é encontrado livremente na natureza, sendo disponibilizado principalmente a partir do processamento mineral, visto que este elemento é utilizado na fabricação de estruturas de construção civil e ligas metálicas.

Cabe destacar que o cromo, de maneira geral, foi encontrado na maioria das pesquisas selecionadas em concentrações muito baixas e inferiores aos limites de quantificação dos métodos adotados por cada estudo, até mesmo no efluente de entrada dos sistemas de tratamento. Assim sendo, apenas dois estudos indicaram resultados quantificáveis na saída dos sistemas de tratamento, sendo as pesquisas de Masindi, Shabalala e Foteinis (2022) e Orden *et al.* (2021), cujos resultados medidos foram de 0,01 mg/L e 0,0001 mg/L, respectivamente. Os percentuais de remoção obtidos para cada pesquisa atingiram os valores de 99,5% para o primeiro, e 90%, para o segundo. Na entrada destes sistemas, os valores medidos já estavam em conformidade com os padrões, sendo 0,1 mg/L para a pesquisa de Masindi, Shabalala e Foteinis (2022) e 0,0218 mg/L na pesquisa de Orden *et al.* (2021).

Diante dos resultados obtidos na entrada dos sistemas de tratamento estudados nas duas pesquisas, é possível identificar que o elemento cromo não possui grande relevância na composição do efluente de DAM, quando comparado a outros parâmetros que não foram tão satisfatoriamente removidos, ou que indicam concentrações muito elevadas na composição do efluente bruto. Logo, é recomendado que os esforços quando do dimensionamento de um sistema de tratamento sejam mais bem direcionados aos parâmetros que possuem maior representatividade para o efluente.

Ferro

Conforme discutido anteriormente, o ferro é um dos elementos mais presentes na DAM, sendo, portanto, um dos maiores focos dos estudos até então desenvolvidos. Este elemento é encontrado de forma livre no ambiente, e é muito comum que, em águas superficiais, o carreamento de sólidos favoreça no aumento das concentrações deste metal, tendo em vista eventos de chuvas intensas (CETESB, 2018).

O reflexo do que foi comentado a respeito da disponibilização natural deste elemento no meio ambiente, pode ser verificado nos limites estabelecidos para o lançamento, que são superiores quando comparados aos limites das demais variáveis até então discutidas. As normas nacionais, DN Copam CERH nº 08/2022 e Resolução Conama nº 430/2011 indicam o padrão máximo de ferro de 15 mg/L para fins de lançamento de efluentes. Já o Decreto chileno nº 90/2001 estabelece o valor máximo de 5 mg/L.

A variação entre as medidas máxima e mínima dos resultados de ferro na saída dos sistemas de tratamento foi alta, sendo a menor medida igual a 0,024 mg/L, enquanto a maior foi de 64,80 mg/L. O menor valor mencionado foi identificado para a pesquisa desenvolvida por Cui *et al.* (2012), e foi obtido a partir de um método de tratamento ativo, utilizando um reator-tanque de agitação contínua, integrado à um tanque de decantação e a um filtro de areia. O tratamento foi desenvolvido em escala piloto, para tratar o efluente originário de uma mina de chumbo e zinco, localizada na Coreia do Sul. O valor de ferro medido na entrada do sistema foi igual a 98 mg/L, resultando em um percentual de remoção próximo a 100%. Destaca-se que o efluente tratado atendeu aos padrões de lançamento estabelecidos por todas as normativas aqui consideradas, visualizadas na Tabela 12.

Já a concentração de 64,80 mg/L, foi encontrada para o metal ferro na saída do sistema de tratamento empregado por Orden *et al.* (2021). Esta medida está bem acima do que determinam as normas aqui utilizadas para fins de comparação. No entanto, há de se levar em consideração que o valor de entrada era muito alto, atingindo cerca de 683,4 mg/L, logo o percentual de remoção foi de aproximadamente 90,5%.

Por outro lado, tendo um efluente bruto caracterizado com concentrações altas de ferro, e considerando que o sistema de tratamento foi desenvolvido em escala real, esse resultado de monitoramento é importante para que os sistemas de tratamento sejam cada vez mais personalizados, tendo em vista as características inerentes ao efluente que será tratado. Outro ponto de atenção com relação a essa temática, é considerar adaptações ao sistema considerando a sazonalidade do local em que ele está sendo implementado, tendo em vista o que foi comentado sobre a influência de chuvas nas concentrações de ferro nas águas.

Manganês

O manganês, assim como o ferro, é muito mencionado nas pesquisas voltadas para o tratamento de DAM. No entanto, este elemento representa uma das maiores dificuldades observadas na busca por tecnologias de tratamento, por indicar um certo nível de dificuldade para a sua remoção.

Este metal ocorre naturalmente em águas superficiais e subterrâneas, porém, as atividades antropogênicas, incluindo a mineração, podem facilitar a contaminação das águas a partir da disponibilização deste elemento no meio (CETESB, 2018). Assim como identificado para o metal ferro, as normas DN Copam CERH nº 08/2022, Resolução Conama nº 430/2011 e o Decreto chileno nº 90/2001 são as que indicam padrão de lançamento para o manganês. Os limites máximos de lançamento identificados para essas normativas são 1 mg/L para as duas primeiras, e 0,3 mg/L para a última.

O valor mínimo de manganês na saída dos sistemas de tratamento dentro das pesquisas selecionadas foi igual a 0,0033 mg/L, identificado na pesquisa de Kiiskila *et al.* (2019). No referido estudo, foi desenvolvido, em escala de bancada, um sistema

de tratamento passivo, que utilizou áreas alagadas com capim vetiver, nos Estados Unidos da América. A medida de entrada para manganês neste sistema foi igual a 0,0219 mg/L, resultando em um percentual de remoção de 84,8%. O efluente bruto, originário de uma mina de carvão, já possuía baixas concentrações de manganês, resultando em um efluente tratado completamente em acordo com os padrões de lançamento.

O maior valor de manganês na saída dos sistemas ocorreu para o tratamento implementado por Jallath *et al.* (2018), e a concentração medida foi equivalente a 8,3 mg/L, que ultrapassou todos os padrões de lançamento presentes na Tabela 12. A concentração de manganês para o efluente bruto era de 41,08 mg/L, portanto, o percentual de remoção deste sistema foi de aproximadamente 80%. A metodologia adotada pelos autores foi um sistema passivo de tratamento em duas etapas, utilizando filito para a remoção de ferro e alumínio, e calcário para remoção de cobre, cádmio, manganês e zinco.

Ambos os estudos mencionados abordam metodologias de tratamento passivas, com princípios distintos. Quando comparados os percentuais de remoção de manganês com os percentuais dos demais parâmetros até aqui discutidos, é perceptível que eles foram ligeiramente menores. Diante disso, recomenda-se que as tecnologias que estão sendo desenvolvidas tragam condições mais efetivas para a remoção de manganês dos efluentes, talvez buscando alternativas complementares a um sistema já implementado, focado na remoção deste elemento.

Níquel

O níquel é normalmente encontrado nas águas superficiais em concentrações próximas a 0,1 mg/L, porém, em áreas de mineração os valores encontrados podem ser muito superiores. Junto à mineração, os meios de liberação de níquel no meio incluem a queima de combustíveis, fusão e modelagem de ligas e indústria alimentícia (CETESB, 2013). Todas as normas disponibilizadas na Tabela 12 possuem limite máximo preconizado para níquel, para fins de lançamento de efluentes.

A pesquisa de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019) foi a que obteve a maior medida de níquel para a saída dos sistemas de tratamento, atingindo o efluente a

concentração final de 0,61 mg/L, frente à uma concentração de saída de 3,3 mg/L. Os valores mencionados resultaram em um percentual de remoção de 82%, e este efluente superou ao padrão determinado pelo Decreto nº 90/2001, cujo limite máximo é igual a 0,2 mg/L. Para as demais normativas, o valor obtido foi satisfatório.

Já o estudo desenvolvido por Khorasanipour, Moore e Naseh (2011) indicou a menor concentração de níquel da saída dos sistemas de tratamento, com concentração de 0,003 mg/L. A referida pesquisa foi aplicada em escala real, inserindo em uma estação de tratamento de efluentes convencional a etapa de adição pasta de cal para o tratamento da drenagem ácida de uma mina de cobre no Irã, sendo, portanto, um método de tratamento ativo. O efluente bruto a ser tratado indicava uma concentração inicial deste parâmetro de 0,0794 mg/L, o que implicou em uma remoção com percentual de 96%. O efluente tratado estava em acordo com todas as diretrizes estabelecidas para níquel utilizadas para fins de comparação na presente pesquisa.

A segunda pesquisa mencionada obteve melhor resultado, porém, é necessário mencionar que o efluente bruto avaliado nesta pesquisa já possuía concentração baixa, quando comparada à do primeiro estudo. Portanto, é muito delicado comparar a efetividade entre os métodos, tendo em vista que as condições do efluente e do meio podem influenciar diretamente na performance das tecnologias aplicadas.

Neste caso, é preciso ressaltar que a segunda pesquisa se refere à uma estação de tratamento já operante, com etapa adicionada, que é um caso muito raro frente aos demais até aqui analisados. Essa opção talvez seja muito interessante para minas localizadas em locais pouco remotos e que já contem com uma estrutura eficiente para coleta, tratamento e lançamento de efluentes, levando em consideração fatores como a frequência de análise da qualidade dos efluentes bruto e tratado, a oportunidade de personalização dos métodos em função da sazonalidade e entre outras contemplações.

pH

Conforme já foi discutido anteriormente na presente pesquisa, o pH tem a capacidade de influenciar nas concentrações de diversos elementos, principalmente os metais. Além disso, a acidez é fator determinante na qualidade do efluente de DAM, e, por

consequência, o pH torna-se um parâmetro fundamental a ser analisado e profundamente entendido quando se trata da temática de efluentes ácidos de mineração. Diante destes fatores, o pH, por sua vez, também se torna decisivo no controle das etapas de um sistema de tratamento de efluentes.

A importância deste parâmetro pode ser verificada, ainda, em função da determinação de faixas de limite mínimo e máximo para o lançamento de efluentes em todas as normas aqui utilizadas. Destaca-se que essa variável não foi avaliada em função do percentual de remoção, tendo em vista que o efluente ácido bruto indica normalmente valores de pH entre 2 e 3, e o ideal é que na saída as medidas estejam em torno de 5 a 9. Portanto, foi aqui avaliado o atendimento ou não dos padrões para o efluente tratado.

O menor valor de pH na saída dos sistemas de tratamento avaliados nos estudos selecionados foi igual a 6,14, medido na pesquisa de RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019). Nessa pesquisa, o valor inicial de pH era de 2,25. Percebe-se que a variação foi considerável, e que o efluente tratado obteve condições satisfatórias quando comparado com as normas utilizadas, conforme a Tabela 12.

Já o valor máximo de pH para os efluentes já tratados ocorreu na pesquisa de Mothetha *et al.* (2023), com uma medida de 10,5. Os autores do referido estudo trataram, em escala de laboratório, o efluente ácido de uma mina de carvão na África do Sul. O método de tratamento aplicado era ativo e utilizava um nanocomposto de metacaulinita rico em Ca e MgO sintetizado mecanicamente para remover a acidez do efluente. O efluente bruto indicava um pH de valor 2. Nota-se que, nesse caso, o valor de pH esteve acima dos padrões máximos delimitados por todas as normas, sendo 9 para a DN Copam CERH nº 08/2022, Resolução Conama nº 430/2011 e CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery - nº 437.14, e 8,5 para o Decreto nº 90/2001.

O pH elevado obtido na pesquisa de Mothetha *et al.* (2023) pode trazer diversas implicações, caso este efluente seja lançado ao meio, tendo em vista a influência que este parâmetro indica em diversos processos, conforme já mencionado. Desta forma, poderia ser recomendado que a quantidade de substratos utilizados seja revista, a fim

de que a remoção de acidez seja menor, mantendo o efluente dentro dos padrões para lançamento.

Uma análise global dos resultados de pH para todos os estudos selecionados demonstra que quase todos os sistemas foram capazes de manter uma medida satisfatória após o tratamento. Assim sendo, é possível concluir que a correção de pH é uma etapa de simples desenvolvimento, se tratando de um dos parâmetros mais relevantes na análise do efluente ácido, devendo, portanto, as tecnologias serem desenvolvidas com maior acurácia no aspecto da remoção de metais, que é o maior desafio nessa temática.

Sulfato

O sulfato, assim como o pH, tem um papel importante na composição da DAM. O sulfato é disponibilizado em águas naturais a partir da dissolução de solos e rochas e da oxidação do sulfeto. O controle deste íon no tratamento de água e efluentes é de extrema importância, tendo em vista que a descarga de efluentes domésticos e industriais no meio é a maior fonte de disponibilização de sulfato nas águas superficiais (CETESB, 2013).

Conforme visualizado no gráfico *box-plot* da Figura 22, as medidas de sulfato nos efluentes brutos dos estudos selecionados foram relativamente altas, atingindo o valor máximo de 30.000 mg/L, e as médias e medianas, também foram altas. Esses resultados demonstram o tamanho do desafio encontrado para remoção de sulfato nos efluentes. No entanto, apenas um dos padrões adotados indica limite máximo de sulfato para lançamento de efluentes, estando o valor de 1000 mg/L disponível no Decreto nº 90/2001.

A medida de sulfato mais relevante na saída dos sistemas de tratamento de DAM foi igual a 7500 mg/L, obtida no estudo de Mothetha *et al.* (2023), o que já era esperado, tendo em vista o pH elevado que o efluente apresentou. Este resultado foi muito maior do que o limite anteriormente mencionado. O valor de sulfato no efluente bruto já era bastante elevado, atingindo o valor de 15000 mg/L, logo, o percentual de remoção foi de 50%. Diante desses resultados, de fato o sistema de tratamento empregado pelos autores não foi tão eficiente nesse aspecto, e necessita de melhorias.

Por sua vez, Torres *et al.* (2018) atingiram um valor final de sulfato de 22 mg/L, diante de percentual de remoção de 99,7%, para um efluente bruto com medida de sulfato igual a 7532 mg/L. O método empregado pelos autores não foi tão eficiente na remoção de metais, porém atuou bem na remoção de sulfato, sendo essa conclusão mais uma vez relevante na discussão de que, muitas vezes, uma única tecnologia não será capaz de tornar um efluente de DAM plenamente satisfatório do ponto de vista das regulações pertinentes.

Zinco

O zinco é um metal que está naturalmente disponível na crosta terrestre, e, além da mineração, as formas mais comuns de liberação deste elemento para o meio a partir de ação antrópica são a combustão de carvão e outros combustíveis, além da eliminação e incineração de resíduos e da utilização de agrotóxicos e fertilizantes (CETESB, 2022). No caso dos padrões de lançamento de efluentes disponíveis na Tabela 12, todos indicam limite máximo para o zinco, sendo 5 mg/L para a DN Copam CERH nº 08/2022 e para a Resolução Conama nº 430/2011, 3 mg/L para o Decreto nº 90/2001 e 0,657 mg/L para o *CFR Guidelines for Waste Treatment Point Source - Subpart A - Metals Treatment and Recovery* - nº 437.14.

O método de tratamento desenvolvido por Jallath *et al.* (2018) obteve a maior medida de zinco na saída dos sistemas de tratamento, com resultado de amostragem igual a 5,2 mg/L. Este valor esteve em desacordo com todas as normativas utilizadas para fins de comparação. O percentual de remoção deste tratamento foi de 98%.

Já a pesquisa desenvolvida por Khorasanipour, Moore e Naseh (2011) representou a menor medida de zinco dentre os estudos analisados, que foi igual a 0,003 mg/L, valor esse que atendeu a todos os padrões de lançamento. O percentual de remoção foi de aproximadamente 100%, considerando que o efluente bruto possuía concentração de zinco igual a 31,53 mg/L.

O primeiro estudo mencionado foi desenvolvido a partir de um sistema de tratamento passivo, enquanto o segundo utilizou de uma tecnologia ativa. Conforme já foi anteriormente discutido, a pesquisa de Jallath *et al.* (2018) não se mostrou efetiva na remoção de alguns metais, como o manganês e o zinco, o que indica que essa

metodologia de adição de alcalinidade precisa ser mais desenvolvida para fins de tratamento de DAM. Por outro lado, a pesquisa de Khorasanipour, Moore e Naseh (2011) além de empregar um método de tratamento bem efetivo na remoção de metais, ele indica uma excelente vantagem em sua implementação, tendo em vista o aproveitamento de uma estação de tratamento já existente, adicionadas as devidas etapas para efetividade do tratamento.

Todas as discussões até aqui realizadas contribuiram para afirmar a hipótese de que não há um caminho certo para definir como deve funcionar uma estação ou uma via de tratamento de DAM, conforme é observado para os efluentes domésticos, em que as etapas são pré-estabelecidas. A caracterização do efluente bruto aqui apresentada reitera ainda mais essa teoria, tendo em vista a amplitude observada para as concentrações de um mesmo parâmetro para efluentes de diversas fontes diferentes.

Além da caracterização do efluente bruto, os fatores físicos intrínsecos ao ambiente em que a DAM é formada são de extrema importância na definição dos métodos de tratamento. Isso se dá pois, de acordo com o que já foi falado, as condições de clima, sazonalidade, relevo, geologia e muitos outros irão afetar diretamente na composição do efluente ácido de mina.

Novamente nessa pesquisa é mencionada a prevalência da adoção de métodos de tratamento passivos, e que muitos deles se mostraram eficientes na remoção de diversos elementos, como a pesquisa de Orden *et al.* (2021). Alguns métodos de tratamento estudados necessitam de aprimoramento, como é o caso dos estudos de Jallath *et al.* (2018) e RoyChowdhury, Sarkar e Datta (2019).

Também foi possível identificar que algumas pesquisas foram eficientes no atendimento a alguns parâmetros, e pouco eficiente para outros, demonstrando mais uma vez que conhecer o efluente bruto é de extrema importância para que o método de tratamento empregado seja bem personalizado em função das características do efluente específico a ser tratado. Nesses casos, também é preciso avaliar a possibilidade de combinação entre métodos diferentes, permitindo que o sistema seja efetivo a longo prazo, necessitando de manutenções mais espaçadas.

Por fim, a análise apresentada neste tópico foi considerada de grande relevância para a temática abordada, tendo em vista que até o momento da elaboração da presente pesquisa não foram identificados estudos prévios que abordassem a caracterização do efluente bruto, tendo em vista as diversas fontes disponíveis. Também não foram encontradas pesquisas anteriores que separassem os parâmetros de maior relevância para a composição da DAM e que descrevessem individualmente estes elementos em função da eficiência de remoção pelos sistemas de tratamento de DAM empregados.

6.3 Análise das tecnologias ofertadas pelo mercado

Essa avaliação foi o maior desafio identificado na condução deste estudo, tendo em vista que os objetivos inicialmente propostos e descritos no item de metodologia foram apenas parcialmente atingidos. Essa dificuldade parte do esforço que foi direcionado ao contato com as empresas, buscando pelas respostas que foram solicitadas e que majoritariamente não foram atendidas.

Conforme descrito no capítulo de metodologia, os contatos iniciais foram realizados com as empresas a partir do *e-mail* disponível nos sites. Para realização dessa etapa, foram selecionadas oito empresas e os e-mails foram enviados individualmente para cada uma delas. Do total de empresas, apenas três retornaram ao primeiro contato.

Para as duas primeiras empresas que responderam ao contato, não foi possível prosseguir com a disponibilização de informações, tendo em vista que ambas solicitaram dados mais precisos para que um orçamento fosse elaborado. Esses dados consistiam, basicamente, em informações que pudessem permitir um dimensionamento de um sistema ou de uma estação de tratamento, como vazão, temperatura, espaço disponível, localização geográfica e entre outros. Dessa maneira, quando foi mais bem explicado para essas empresas o fim acadêmico envolvido, ambas informaram que não poderiam colaborar com o estudo. Uma delas acabou compartilhando uma cartilha de serviços que, por sua vez, não apresentava informações relevantes para o trabalho desenvolvido.

A terceira empresa que respondeu ao contato, disponibilizou uma planilha de custos de *Operational Expenditure* (OPEX), custo este relacionado às despesas operacionais. A planilha continha custos orçados para diversos tratamentos diferentes

oferecidos pela empresa, em caráter de projetos a nível conceitual, sendo apenas um relacionado à temática de DAM. Essas informações foram detalhadas e discutidas posteriormente neste capítulo.

Tendo em vista o baixo índice de retorno por parte das empresas, uma segunda tentativa de contato foi realizada, conforme explicado no capítulo de metodologia. Foram enviadas mensagens às cinco empresas restantes, e, novamente, nenhum retorno foi obtido por parte destas. No entanto, para uma dessas companhias, foi identificado no site uma cartilha de serviços, que, apesar de não conter custos, auxiliou no levantamento de o que o mercado está oferecendo como solução ao tratamento de DAM e qual é o princípio de funcionamento dessas tecnologias. A discussão referente a esta empresa em específico também será realizada mais à frente nessa pesquisa.

Todas essas informações até aqui descritas estão disponíveis na Tabela 13.

Tabela 13 – Informações das Empresas, Meios de Contato e Tratamentos Oferecidos

Empresa	Localização	Via de Contato	Sucesso no(s) Contato(s)?	Tratamento
A	Belo Horizonte/MG	E-mail	Sim	-
B	Belo Horizonte/MG	E-mail	Sim	-
C	Belo Horizonte/MG	E-mail	Sim	Calhas calcárias
D	Cajuru/Curitiba	E-mail/WhatsApp	Não	-
E	Criciúma/SC	E-mail/WhatsApp	Não	-
F	Maceió/AL	E-mail/WhatsApp	Não	-
G	São Paulo/SP	E-mail/WhatsApp	Não	-
H	Piracicaba/SP	E-mail/WhatsApp/Site	Não	Alternativas de remoção de sulfato, arsênio e metais diversos

Fonte: Autora (2023).

Diante do que foi descrito e observado na Tabela 13, e dos estudos prévios selecionados para essa etapa, conforme descrito na metodologia, as informações dos custos a serem utilizadas foram as disponíveis para a empresa C e para as pesquisas de Hedin *et al.* (2010), Aguiar *et al.* (2016), Masindi *et al.* (2018) e Wibowo *et al.* (2022).

Conforme descrito no capítulo de metodologia, foram acrescidos ao valor do tratamento os percentuais de inflação para cada estudo. A sumarização dos percentuais está descrita na Tabela 14, considerando o estudo, o local de aplicação e as respectivas inflações por ano.

Tabela 14 – Inflação por País dos Estudos/Cotação dos Métodos de Tratamento de DAM

Estudo	Localização	Total Inflação País/Período
Hedin <i>et al.</i> (2010)	EUA	35,8% (2010 - 2023)
Aguiar <i>et al.</i> (2016)	Brasil	27,4% (2016 - 2023)
Masindi <i>et al.</i> (2018)	África do Sul	29,6% (2018 - 2023)
Wibowo <i>et al.</i> (2022)	Indonésia	7,9% (2022 - 2023)
Empresa C	Brasil	4,1% (2023)

Fonte: Inflation.eu Worldwide Inflation Data (2024).

Na sequência, de posse dos percentuais de inflação, foram calculados os valores dos tratamentos empregados pelos estudos e pela empresa C, considerando o início do ano de 2024. A Tabela 15 demonstra os tipos de tratamento dos estudos e da Empresa C, o valor original de tratamento, o percentual de inflação que foi multiplicado pelo valor original, e o respectivo custo final, considerando o cenário do primeiro semestre do ano de 2024. Destaca-se que para todos os estudos, e para a Empresa C, os valores adotados consideram a implantação e a manutenção do sistema.

Tabela 15 – Tipo de Tratamento, Descrição, Valor Original, Total da Inflação e Valor Total do Tratamento por Estudo e para a Empresa C

Estudo	Tipo de Tratamento	Descrição do Tratamento	Valor Original Tratamento (dólar)	Total Inflação	Total Tratamento 2024
Hedin <i>et al.</i> (2010)	Passivo	Lagoas de fluxo vertical (SSPA)	\$2.500.000,00	35,8%	\$3.394.500,00
Aguiar <i>et al.</i> (2016)	Ativo	Membrana de nanofiltração + Osmose inversa	\$516.952,80	27,4%	\$658.804,65
Masindi <i>et al.</i> (2018)	Ativo	Estação de tratamento: Neutralização/Adição de Calcário/Adição de Carbonato de sódio/Borbulhamento de CO ₂	\$16.500,00	29,6%	\$21.380,70

Wibowo <i>et al.</i> (2022)	Passivo	Wetlands construídos utilizando fitorremediação	\$85.960,00	7,9%	\$92.750,84
Empresa C	Passivo	Calhas calcárias	\$314.965,46	4,1%	\$328.005,03

Fonte: Inflation.eu Worldwide Inflation Data (2024). Autora (2024).

É importante destacar que cada estudo e a Empresa C possuem um período previsto para o valor total cotado para os respectivos tratamentos. De forma a possibilitar que todos os valores levantados possam ser comparados seguindo a mesma escala temporal, a Tabela 16 demonstra o período considerado para cada estudo e para a Empresa C. Além disso, a última coluna da tabela demonstra o custo anual de cada tipo de tratamento.

Tabela 16 – Escala da Cotação Original e Valor Total Anual do Tratamento, por Estudo e para a Empresa C

Estudo	Tipo de Tratamento	Escala Cotação (Anos)	Total Tratamento 2024 (dólar)	Total Tratamento por Ano (dólar)
Hedin <i>et al.</i> (2010)	Passivo	20	\$3.394.500,00	\$169.725,00
Aguiar <i>et al.</i> (2016)	Ativo	15	\$658.804,65	\$43.920,31
Masindi <i>et al.</i> (2018)	Ativo	20	\$21.380,70	\$1.069,04
Wibowo <i>et al.</i> (2022)	Passivo	20	\$92.750,84	\$4.637,54
Empresa C	Passivo	1	\$328.005,03	\$328.005,03

Fonte: Autora (2024).

A partir da análise das Tabela 15 e Tabela 16, foi possível observar que há uma grande variação entre os custos de implantação e manutenção em função do tipo de tratamento adotado. O sistema passivo de lagoas de fluxo vertical (SSPA) foi o mais caro em relação aos demais, seguido do sistema de calhas calcárias da Empresa C, enquanto a estação de tratamento ativa adotada por Masindi *et al.* (2018) foi o tratamento mais barato. Anteriormente foi discutido que uma das vantagens de se utilizar tecnologias de tratamentos passivos era o custo-benefício, tendo em vista sua baixa necessidade por manutenção.

De fato, a manutenção é um fator crucial, e no caso da Empresa C esta ação representa 25% (\$62.993,09) do valor de implantação do sistema (\$251.972,36). Porém, há de se salientar que os 75% restantes dizem respeito ao custo do insumo (calcário), que torna o sistema mais caro do que os demais. Ainda sobre a Empresa

C, é necessário salientar que esta é a única cotação do mercado que foi fornecida para o estudo, o que pode justificar a diferença discrepante do valor anual deste sistema de tratamento em relação aos demais.

Novamente é necessário atribuir aos fatores externos as diferenças observadas em relação aos métodos de tratamento e seus respectivos custos. Para estes fatores, podem ser mencionados a vazão do efluente a ser tratado, que vai demandar mais ou menos insumo, esforço e área do sistema; a caracterização físico-química do efluente, que também vai determinar a quantidade e o tipo insumo necessários; a competitividade entre as empresas que poderão ser contratadas e seus valores de mercado; a modelagem e caracterização geoquímica do local, que irá estabelecer por quanto tempo o sistema de tratamento será demandado.

Um fator relevante que pôde ser observado, é o tempo estimado para a aplicação dos métodos de tratamento dos estudos abordados. Todos os autores estimaram que o sistema iria operar por um período entre 15 e 20 anos. Isso, mais uma vez, demonstra a importância de prever e prevenir a formação da DAM, tendo em vista que, quanto mais tarde for iniciado o processo de tratamento, quando a prevenção não puder ser aplicada, mais longo será o período necessário para que a DAM seja eficientemente remediada.

Este fato é de extrema relevância no contexto de fechamento de mina e estabilidade química a longo prazo, muito em função de que o empreendedor ou o responsável pela manutenção desta área ficará muitos anos após o fim das operações arcando com os custos de remediação e controle da DAM, custos estes que tendem a aumentar com o passar dos anos devido à inflação, conforme reportado neste estudo. Com isso, torna-se difícil a manutenção da estabilidade química, e, por consequência, a aplicação de um uso futuro para a área anteriormente minerada, desfavorecendo possíveis partes interessadas pelo território, seja a população do entorno, seja o poder público, seja a própria empresa de mineração.

No contexto de fechamento, a aplicação tardia do tratamento da DAM, estendendo-se ao seu fechamento, poderá ser um fator que irá ocasionar o desinteresse do responsável pela atividade minerária em continuar a operação na área, abandonando-a e gerando mais um passivo ambiental. Diante disso, mais uma vez é salientada a

importância da atuação de órgãos competentes na fiscalização e no estabelecimento de normas e diretrizes que visem vincular a DAM como uma obrigação legal, passível de ônus reputacional e financeiro à empresa que não cumprir com os deveres e responsabilidades de extinção da DAM em uma área.

6.4 Normas e regulações em relação à DAM em Minas Gerais, no Brasil e no Mundo em vistas ao fechamento de mina

O presente estudo buscou dar enfoque no contexto de fechamento de mina, assunto esse amplamente discutido anteriormente, levando em consideração que a forma na qual um território anteriormente minerado é mantido e cuidado a partir do seu fechamento irá determinar diversas condições de estabilização ambiental. Essa estabilização pode ser nos caracteres químico, físico e biológico.

Diante disso e do que foi descrito no tópico de método, e visando o atingimento dos objetivos desse estudo, na sequência, estão descritas as formas de atuação de órgãos ambientais frente à DAM em minas paralisadas, abandonadas, e fechadas em processo de monitoramento e manutenção, considerando as esferas estadual, nacional e internacional, abordando os países mais frequentemente mencionados nos estudos pretéritos: Brasil, Estados Unidos da América, Canadá, China, Inglaterra e África do Sul.

Atuação do Órgão Estadual frente à DAM em minas Paralisadas/Abandonadas

No Estado de Minas Gerais, o monitoramento e a gestão de minas paralisadas e abandonadas estão diretamente relacionados com a Gerência de Recuperação de Áreas de Mineração e Gestão de Barragens (GERAM), que pertence à Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM s.d.).

Neste contexto, aplica-se a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), número 220, de 21 de março de 2018, que regulariza e estabelece diretrizes para a elaboração dos relatórios de paralisação das atividades minerárias, bem como da elaboração do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) para empreendimentos de classe 1 (pequeno porte), 2 (médio porte e pequeno potencial poluidor), 3 (pequeno porte e grande potencial poluidor ou médio porte e médio potencial poluidor) e 4 (grande porte e pequeno potencial poluidor), e

Plano Ambiental de Fechamento de Mina (PAFEM), para empreendimentos de classe 4 (COPAM, 2018).

Ainda em relação à atuação dos órgãos ambientais estaduais frente à existência de minas paralisadas e abandonadas, a FEAM disponibiliza ao público o Cadastro de Minas Abandonadas no Estado de Minas Gerais, elaborado em 2016, que, de acordo com a FEAM (s.d.) é um levantamento pioneiro no Brasil, o qual aborda a situação de 400 minas de diversas tipologias diferentes. Já em novo levantamento, realizado em 2022, foram identificadas quinhentas e vinte minas paralisadas e abandonadas no Estado de Minas Gerais.

Para fins de regularização de áreas contaminadas, o Estado de Minas Gerais também conta com a Gerência de Áreas Contaminadas (GERAC), que dispõe de duas normativas relacionadas com essa temática. A Deliberação Normativa COPAM nº 116/2008 “Dispõe sobre a declaração de informações relativas à identificação de áreas suspeitas de contaminação e contaminadas por substâncias químicas no Estado de Minas Gerais” (COPAM, 2008).

Não foram identificadas, até o momento da elaboração do presente estudo, legislações ambientais no Estado de Minas Gerais ou nos demais estados da federação voltadas exclusivamente para a temática da DAM em minas abandonadas/paralisadas como um passivo ambiental não remediado, ou que tratem exclusivamente de padrões de lançamento para efluentes ácidos de mineração. Também não foram encontrados documentos de órgãos e entidades ambientais que atestem sobre a prevenção da DAM.

Tomando como premissa que os órgãos ambientais estaduais se baseiam nas normativas até então descritas, é possível presumir que, nas condições estabelecidas, estas entidades somente irão tomar conhecimento sobre minas paralisadas e DAM a longo prazo quando as empresas fazem a notificação sobre a existência dessas condições. Na sequência, apresenta-se a análise das normas identificadas para os mesmos fins em caráter internacional, considerando os países mencionados no tópico de metodologia.

Estados Unidos da América

Os Estados Unidos da América apresentam muitas discussões a respeito da DAM envolvendo órgãos ambientais. A primeira diretriz encontrada foi elaborada pela EPA, na forma de um documento técnico voltado à prevenção à geração da DAM. O documento foi publicado em 1994 e apresenta algumas ferramentas de gerenciamento para minas que não sejam de carvão, resumindo os métodos de predição da formação de ácido, a partir de métodos como modelagem e amostragem.

De acordo com o documento, o prognóstico da formação da DAM depende de seis passos: (I) definir a geologia ou litologia do local e descrever detalhadamente a mineralogia da região ao longo do processo ativo de mineração (II) desenvolver um plano de amostragem de rochas (III) realizar testes estáticos ou cinéticos para avaliar o potencial de formação de acidez (IV) avaliar os critérios de amostragem e realizar testes cinéticos adicionais, vide necessidade (V) desenvolver uma modelagem apropriada (VI) classificar as unidades geológicas/litológicas como ácidas, não formadoras de acidez ou incertas.

O intuito do relatório era auxiliar tanto as empresas de mineração, quanto o Estado, no emprego de atividades de predição e prevenção da formação da DAM em uma área. A *U.S. EPA* também publicou em 2000 um manual de caracterização e limpeza de um local de mina abandonada. Dentro das diversas diretrizes apresentadas pelo documento, focadas na caracterização e mitigação de variados impactos ambientais ocasionados pelas atividades de mineração, são fornecidas informações e referências para remediação de DAM em um contexto de minas abandonadas. Dentro dessas referências, destacam-se orientações gerais para elaboração de estudos de background, apresentação de tecnologias de tratamento químico, de estabilização, solidificação e descontaminação, coleta, desvio e contenção de contaminação. Além disso, é incentivado o uso de tecnologias inovadoras como a fitorremediação e a biorremediação.

Partindo para um contexto regulatório, o título 40 do Código de Regulações Federais americano diz respeito à proteção do meio ambiente. Seguindo para o capítulo I, que trata da Agência de Proteção Ambiental, tem-se o subcapítulo N, que traz as diretrizes e os padrões de efluentes, e a parte 434 deste subcapítulo relaciona-se aos padrões de desempenho e de fonte de DAM para minas de carvão. Ainda, a subparte C deste

item trata especificamente de DAM em uma área de mineração de carvão ativa de qualquer categoria, apresentando limites de lançamento de ferro, manganês, sólidos totais e pH para o efluente após tratamento. Os limites determinados podem ser visualizados na Tabela 17.

Tabela 17 – Limites para Lançamentos de Efluentes de Acordo com a *Part 434, Subpart C - Acid or Ferruginous Mine Drainage*

Poluente	Unidade	Valor máximo para 1 dia	Média de valores diários durante 30 dias consecutivos
Ferro total	mg/L	7,0	3,5
Manganês, total	mg/L	4,0	2,0
Sólidos Suspensos totais	mg/L	70,0	35,0
pH	-	6 - 9	6 - 9

Fonte: Autora (2023).

Todos os documentos citados são de suma importância na avaliação da DAM em caráter preventivo e mitigatório.

Canadá

Para o Canadá, foi encontrada uma página do Governo do Canadá que expõe informações sobre fechamento de mina, recuperação e monitoramento no território de Nunavut, localizado ao norte do Canadá. Tais diretrizes incorporam temáticas de recuperação ambiental no fechamento, além de informar que ao longo da operação da mina, devem ser submetidos ao *Nunavut Water Board* (NWB) - Conselho de Água de Nunavut, quais medidas estão sendo implementadas para minimizar o aporte de DAM aos recursos hídricos.

Essa medida vai em acordo com o que já foi discutido, tendo em vista que a adoção de ações preventivas e até mesmo mitigatórias ao ainda da etapa de exploração mineral podem evitar que a DAM se torne um problema a longo prazo, principalmente em minas paralisadas ou abandonadas.

Ainda, foi encontrado o regulamento sobre efluentes de mineração de metais e diamantes, *Regulação Statutory Orders and Regulations* (SOR) – Ordens e Regulamentos Legais - número 222 de 2002. Essa regulamentação não oferece nenhuma determinação legal a respeito da DAM, porém indica orientações e determinações para lançamento e monitoramento de efluentes de origem minerária.

Essa norma se estende, ainda, às condições de depósito de rejeitos em estruturas de contenção como barragens.

Especificamente quanto às barragens de mineração, a regulação proíbe a diluição de efluentes com água ou qualquer outro efluente anteriormente à sua deposição nas estruturas. Ainda, é exigido que o proprietário ou operador da mina realize estudos de monitoramento ambiental, utilizando métodos documentados e válidos, devendo os resultados ser interpretados e comunicados de acordo com padrões geralmente aceitos, submetendo os resultados ao Ministro do Ambiente.

Além disso, o regulamento dispõe de orientações para a elaboração de relatórios anuais dos resultados de monitoramento dos efluentes, indicando resultados dos testes para diversas substâncias nos pontos de descarga final de efluentes.

Por fim, foi identificado o *Mine Environment Neutral Drainage* (MEND) que é um programa canadense fundado em 1989, com o objetivo de desenvolver tecnologias para prevenir, controlar e modelar a DAM, além de desenvolver e testar os mais diversos métodos de tratamento. Este programa conta em seu corpo com representantes da indústria de mineração, dos governos federais e provinciais e, ainda, de organizações não-governamentais. Foi identificado pelo programa um enorme progresso nas temáticas mencionadas, e em termos mais incipientes, estão sendo desenvolvidas tecnologias favoráveis ao meio ambiente nos aspectos de abertura e fechamento de uma mina, a curto e longo prazo.

Outros Países

Para a Inglaterra, foi identificado um programa governamental identificado como Água e Minas Abandonadas de Metal, que forneceu patrocínio às entidades *Coal Authority* (Autoridade do Carvão) – e *Environment Agency* (Agência Ambiental) para recuperar recursos hídricos historicamente impactados pela mineração de metais.

Essa iniciativa do governo inglês foi tomada tendo em vista que até o ano de 1999 não havia nenhuma regulamentação que proibisse uma empresa de mineração de abandonar um site, sendo completamente desconsideradas as responsabilidades de lançamento de águas contaminadas ao meio ambiente. Cerca de sete bacias

hidrográficas foram alvo desta iniciativa, sendo afetadas parcialmente pela presença de águas de mineração contaminadas.

Para a China e a África do Sul, não foram identificadas normativas, resoluções ou instruções a respeito da DAM, ou do lançamento de efluentes de mineração. Para esses casos, e para as localidades nas quais não há diretrizes específicas para essa temática, como é identificado para o Estado de Minas Gerais, no Brasil, as entidades governamentais e de meio ambiente só conseguem tomar conhecimento da existência da DAM em uma área quando as empresas comunicam a respeito da existência da contaminação. A problemática envolvida com essa questão é o fato de que, dessa forma, dificilmente os empreendimentos irão lidar com esse problema de maneira incisiva, prevenindo e mitigando de maneira correta.

6.5 Potencialidades, fragilidades e oportunidades de melhoria

Sem dúvida, a principal fragilidade identificada sobre o tema DAM no contexto do presente estudo foi a falta de participação dos órgãos ambientais e demais entidades competentes na criação de mecanismos que os apoiem tanto na regulação de metais quanto no monitoramento da existência de DAM em uma mina durante sua operação. Neste mesmo contexto, os conceitos de previsão e prevenção ainda precisam ser mais bem difundidos na cultura das mineradoras, tendo em vista que desta forma, os índices de contaminação da água pela DAM podem ser reduzidos.

Sabe-se que os impactos adversos da DAM vêm interferindo no meio ambiente há muitos anos em todo o mundo, e que muitas minas abandonadas e fechadas podem estar contribuindo para isso, e a identificação de todas as fontes poluidoras pode ser difícil em locais que têm intensa e atividade extrativa espaçada. Dessa forma, o cadastro de minas paradas desenvolvido pelo governo do Estado de Minas Gerais é um ponto de partida para identificar essas fontes e, aliado a uma estratégia próxima à desenvolvida pelo governo inglês, de oferecer recursos para a recuperação de cursos d'água historicamente impactados, cria-se uma segunda etapa na busca pela recuperação das águas impactadas pela DAM.

Outra lacuna observada está relacionada à deficiência na definição do período de aplicação dos métodos de tratamento, para que a DAM possa ser efetivamente

mitigada em uma área. Conhecendo as diversas variáveis que afetam a formação e, conseqüentemente, a remoção da DAM, os esforços precisam ser mais bem direcionados para definir os critérios de sucesso e interromper o tratamento da DAM. Nos estudos anteriores aqui apresentados, essas informações não foram destacadas com a devida relevância, e algumas recomendações para o desenvolvimento de um plano de interrupção das atividades de tratamento são:

- Aplicar estudos de modelagem geoquímica para identificar o comportamento dos contaminantes e quanto tempo permanecerão no meio ambiente;
- Utilizar a melhor tecnologia disponível para o efluente específico de cada mina, com base em testes de caracterização do efluente;
- Combinar diferentes tecnologias, pois existe a possibilidade de uma tecnologia isolada não ser eficiente na remoção e atendimento de todos os parâmetros de acordo com a legislação aplicável;
- Verificar a influência da sazonalidade na composição dos efluentes e no funcionamento das tecnologias de tratamento e, se for o caso, adaptar os sistemas em função da época do ano;
- Implantar uma estação de tratamento no início da operação, para que ao final, ou em caso de parada da mina, o efluente contaminado já tenha sido previamente tratado;
- Adotar medidas de proteção para estruturas que recebem resíduos e/ou resíduos ainda em projeto, para evitar a infiltração de efluentes ácidos no solo e nos aquíferos;
- Manter e melhorar o monitoramento da qualidade da água e dos efluentes da mina para que eventuais alterações sejam rapidamente identificadas e sanadas.

Outro ponto que pode ser apontado como ponto fraco é que, no caso de minas abandonadas com fonte de geração de DAM ativa, não há um responsável pela área em si. Desta forma, a área e seus respectivos passivos passam a ser objeto de responsabilidade daquele município, ou do Estado. Se a entidade competente desconhece a existência desta fonte, e a empresa que abandonou a mina não é responsável, quem será designado para resolver o problema, para que este não recaia sobre as gerações futuras e se torne um problema cada vez maior? Neste aspecto, é

de extrema importância que, ainda na fase de licenciamento, o projeto esteja sujeito a condições que atestem a responsabilidade do empresário por eventuais encargos decorrentes do DAM na área mineira, tal como já é feito para outras questões. Além disso, ao final da operação da mina, é preciso que seja apresentado aos órgãos competentes um plano de fechamento que contenha todas as medidas de recuperação de áreas degradadas previstas para a área.

Um exemplo do ano de 2023, de uma condicionante ambiental para fins de licenciamento ambiental simplificado no Estado de Minas Gerais, indicam ao proprietário do empreendimento minerário a obrigação de cumprir a destinação de material estéril para alimentação do processo ou para pilhas preparadas para receber material com potencial de geração de DAM. As obrigações estendem-se ainda à instalação e manutenção de sistemas de drenagem, adequação topográfica e paisagística da mina e depósito de resíduos, implementação de medidas de proteção superficial na unidade de transformação, instalação de apoio, depósito de mina e resíduos e monitoramento e manutenção.

Nesta linha, outra forma de minimizar os impactos adversos antes do início da operação do projeto é o órgão responsável pela obtenção do licenciamento exigir da empresa estudos de previsão de DAM ainda nas etapas preliminares do licenciamento, para que, no caso da possibilidade de geração de DAM, as condições já são aplicadas na fase de concessão e liberação das atividades.

Na perspectiva do termo ESG que foi anteriormente abordado, a empresa Atlantic Nickel disponibiliza em seu *site* as práticas adotadas pela empresa no quesito de governança social, ambiental e corporativa, sendo mencionado um Padrão de Sistema de Gestão interno do empreendimento, relacionado à DAM. É mencionado que o objetivo do documento é: “Identificar, gerenciar e estabelecer controles aos riscos associados à Drenagem da Ácida de Mina, prevenindo impactos adversos e evitar contaminação de corpos hídricos na área de influência direta e indireta da Atlantic Nickel.” (ATLANTIC NICKEL, S.D.).

Já a empresa Nexa Resources S.A. possui publicado em seu *site* o relatório anual de ESG de 2023, referente ao ciclo do ano de 2022. Neste relatório estão disponibilizadas todas as iniciativas e resultados relativos às esferas ambiental, social e governança.

No mencionado relatório constam os registros de ocorrência de DAM em suas unidades, bem como o *status*, sendo prevista para ocorrer, ativamente mitigada ou em tratamento ou remediação (NEXA RESOURCES, 2023). Este relatório de sustentabilidade demonstra uma boa prática aplicada pela empresa, sendo o caráter de conhecer as possibilidades de geração de DAM e a mitigação e remediação deste impacto.

Os relatórios elaborados pelas empresas mencionadas vão de acordo com as oportunidades de melhorias mencionadas neste trabalho e estão alinhados às práticas ESG. É de extrema importância que todas as empresas de mineração adotem a mesma postura, visando que o empreendimento possa se desenvolver de maneira sustentável e empregando ações que possam prever, prevenir e mitigar a formação da DAM.

7 CONCLUSÕES

O aspecto mais relevante que deve ser abordado em qualquer estudo relacionado à DAM é, sem dúvida, a prevenção à geração. Conhecer a litologia e geologia local antes de iniciar a exploração permite a aplicação de estudos de modelagem e a compreensão do potencial de geração de acidez que as rochas depositadas oferecem. Desta forma, conhecer os danos que podem estar associados à exploração de uma área, favorece a aplicação de medidas preventivas, assim reduzindo a possibilidade de contaminação da DAM a longo prazo.

A respeito do tratamento da DAM, historicamente os métodos mais difundidos aplicados para esse fim são os passivos, tendo em vista que, se bem dimensionada, uma estação de tratamento passiva pode operar por décadas com necessidades mínimas de manutenção, impactando diretamente no aspecto financeiro, o que torna esta alternativa atrativa para empresas de mineração.

Quanto à caracterização físico-química do efluente, foram identificados os parâmetros mais relevantes que compõem a DAM, tendo como base os estudos selecionados. Estes parâmetros são alcalinidade, alumínio, arsênio, cálcio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, condutividade elétrica, cromo, ferro, magnésio, manganês, níquel, pH, potássio, sódio, sulfato e zinco.

Considerando a base de estudos prévios internacionais, as tecnologias passivas estão alinhadas ao contexto brasileiro de minas abandonadas com DAM como passivo ambiental. Porém, diante das tendências internacionais, deve-se considerar que as tecnologias biológicas associadas aos processos já aplicados nas estações de tratamento de efluentes em uma mina são uma excelente oportunidade para aproveitar os esforços relacionados à operação, mão de obra e insumos, podendo fazer sentido no cenário brasileiro.

Houve um crescimento considerável na elaboração de estudos voltados para a temática dos tratamentos de DAM a partir da década de 1990. Esse crescimento, além de estar associado ao desenvolvimento tecnológico, foi influenciado pela criação de diretrizes ao longo do tempo que trouxeram maior visibilidade para este problema, principalmente no contexto internacional.

Foram identificadas algumas lacunas no contexto da presença da DAM numa área e dos seus efeitos a longo prazo quando esta não é corretamente corrigida. As principais lacunas estão relacionadas com a falta de ação dos órgãos e instituições ambientais responsáveis pela regulação das atividades minerárias em todas as fases do processo de desenvolvimento mineiro, desde o licenciamento até o encerramento da mina, incluindo o estabelecimento de normas reguladoras.

Outro fator relevante que contribui para a permanência da DAM como passivo ambiental é a aplicação de métodos que não são completamente eficazes para sua remoção, desconsiderando a interferência de fatores físicos como sazonalidade, localização geográfica e composição do efluente. Também é importante mencionar uma baixa abordagem aos aspectos relacionados ao caráter preventivo da DAM, o que também se soma à falta de regulamentação por parte dos órgãos competentes, mesmo na fase de licenciamento ambiental de uma mina.

Além disso, com base na análise de estudos anteriores, é possível concluir que não existe um conjunto de diretrizes específicas para definir como deve funcionar uma estação ou rota de tratamento de DAM, ao contrário do que se observa no caso dos efluentes domésticos, em que as etapas são pré-estabelecidas. A caracterização geral do efluente bruto apresentada no presente estudo reforça a percepção desta

importante lacuna, considerando a amplitude observada para as concentrações de um mesmo parâmetro para efluentes de fontes diferentes.

A maioria dos estudos prévios analisados neste trabalho foram focados em minas de carvão e os métodos de tratamento mais utilizados foram passivos. As minas de carvão são exploradas há muitos anos e, da mesma forma, os métodos de tratamento passivo são estudados e implementados há muito tempo, pois indicam menor necessidade de manutenção e baixos custos de implementação.

É necessário que o Brasil como um todo, e o Estado de Minas Gerais, melhorem as abordagens voltadas para controle e mitigação da DAM, dado o levantamento de minas paralisadas e abandonadas no Estado realizado em 2022, que indicou a existência de cerca de 520 minas nesta situação. Há registros de condicionantes elaboradas por órgãos ambientais direcionadas a algumas mineradoras, o que é sem dúvidas um passo importante.

Sem dúvida, o primeiro passo a ser dado é difundir junto às mineradoras a ideia de que a prevenção é o melhor caminho, e isso só será possível com maior pressão dos órgãos ambientais, incluindo a criação de regras e padrões, exigindo por meio de estudos focados neste tema, a fiscalização recorrente e a adoção de padrões de lançamento de efluentes ácidos, como já é adotado nos EUA, por exemplo. Além disso, as iniciativas governamentais destinadas a recuperar os recursos hídricos, conforme ocorre atualmente na Inglaterra, são importantes para cobrir cursos de água fortemente impactados pela DAM devido ao abandono de minas.

O *GARD Guide* aborda diretrizes extremamente relevantes nos aspectos de prevenção da DAM e, por ser uma recomendação internacional, pode e deve ser utilizado pelo Brasil como um manual para essas ações de prevenção. O passo inicial a ser adotado envolve limitar o contato entre água e oxigênio em estruturas que possuem estéril ou estéril depositado, bem como maximizar a disponibilidade de materiais neutralizadores de ácidos e alcalinidade nessas estruturas.

Quanto aos custos de métodos de tratamento, estes também são influenciados por fatores externos, como a característica físico-química do efluente a ser tratado e a vazão que o sistema irá receber. Uma diferença identificada entre valores cotados em

estudos e o valor cotado pela Empresa C, do mercado Brasileiro, é o fato de que os estudos estimam cerca de 15 a 20 anos para a operação do sistema, enquanto a Empresa C oferece um custo anual.

Além disso, o custo para tratamento se mostrou elevado na maioria dos casos, levantando um alerta sobre a importância de se conhecer a potencialidade de geração de DAM de uma área antes do início das operações, tendo em vista que quanto mais tarde for iniciado o processo de tratamento, mais longo será o período necessário para que a DAM seja eficientemente remediada. Com isso, gera-se a preocupação de que o tratamento se estenda por muito tempo, criando na empresa responsável um desinteresse em prosseguir com o tratamento, gerando mais uma mina abandonada com DAM como passivo ambiental.

8 RECOMENDAÇÕES

Os efeitos negativos da falta de controle sobre a geração de DAM na exploração mineral em todo o mundo há séculos estão sendo percebidos pela geração atual. Para evitar que isso continue acontecendo, algumas recomendações foram destacadas às empresas de mineração:

- Aplicação de estudos de modelagem geoquímica;
- Utilização da melhor tecnologia disponível;
- Associação de diferentes tecnologias de tratamento;
- Avaliação da influência da sazonalidade e de outros fatores físicos na região;
- Implantação de estação de tratamento no início da operação;
- Adoção de medidas de proteção às estruturas que recebem resíduos e/ou rejeitos;
- Manutenção e melhoria do monitoramento da qualidade da água e dos efluentes da mina.

Em relação à atuação dos órgãos ambientais, as recomendações e sugestões levantadas no estudo foram giraram em torno da implementação de normas ou regulamentações que estejam voltadas para:

- Investigação prévia do potencial de geração de DAM ainda na fase de licenciamento;

- Padrões de lançamento para efluentes ácidos.

Espera-se que este estudo possa contribuir para uma maior maturidade nas estratégias que visam prevenir e controlar a DAM, auxiliando as indústrias mineiras e o poder público. Espera-se também que esta metodologia possa ser aplicada no Brasil e em outros países que enfrentam esse tipo de desafio ambiental sobre a manutenção da estabilidade química das áreas de mineração no longo prazo.

9 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 20 p.
- ACHARYA, B. S.; KHAREL, G. Acid mine drainage from coal mining in the United States – An overview. *Journal of Hydrology*, volume 588, September 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125061>>. Acesso em: 02 ago. 2023.
- ADEOLA, A. A.; ALI, M. E. JOHAN, M. R.; SAIDUR, R.; QURBAN, M. A.; SALEH, T. A. Polycyclic aromatic hydrocarbons extraction and removal from wastewater by carbon nanotubes: A review of the current technologies, challenges and prospects. **Process Safety and Environmental Protection**, volume 122, February 2019, pages 68-82. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.11.006>>. Acesso em: 06 set. 2023.
- AGUIAR, A. O.; ANDRADE, L. H.; RICCI, B. C.; PIRES, W. L.; MIRANDA, G. A.; AMARAL, M. C. S. Gold acid mine drainage treatment by membrane separation processes: An evaluation of the main operational conditions, **Separation and Purification Technology**, volume 170, 1 october 2016, pages 360-369. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.00>>. Acesso em: 25 jun. 2023.
- AKABZAA, T. M.; YIADANA, S. M. An integrated approach to environmental risk assessment of cumulatively impacted drainage basin from mining activities in southwestern Ghana. *Environmental Earth Sciences*, 2012, volume 65, issue 1, pages 291-312. Disponível em: <[10.1007/s12665-011-1090-0](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1090-0)>. Acesso em: 12 mai. 2023.
- AKCIL, A.; KOLDAS, S. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment, and case studies. **Journal of Cleaner Production** v. 14, issues 12-13, pag. 1139-1145, 2006. DOI 10.1016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>>. Acesso em: 13 nov. 2022.
- ALVES, A. N. L. ROSA, H. V. D. Exposição ocupacional ao cobalto: aspectos toxicológicos. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, vol. 39, n. 2, abr./jun., 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcf/a/GLnqGsyCrbb5jcWTgktJFsh/?format=pdf>>. Acesso em: 06 out. 2023.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS; IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. 2006. A Gestão dos Recursos Hídricos e a Mineração. Brasília, DF. 2006. Disponível em: <<https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/a-gestao-dos-recursos-hidricos-e-a-mineracao.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2022.
- ARAÚJO, S. F. Estudo da utilização de lama grossa de aciaria no tratamento de drenagem ácida de mina sintética e real em escala laboratorial. 2020. 220 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH) – Universidade Federal de Minas

Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em:
<<https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1299D.PDF>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

ATLANTIK NICKEL. GOVERNANÇA SOCIAL, AMBIENTAL E CORPORATIVA (ESG). Disponível em: <<https://atlanticnickel.com/esg/>>. Acesso em: 21 jan 2024.

AZEVEDO, F.A.; CHASIN, A.A.M. (eds). **Metais: Gerenciamento da toxicidade**. São Paulo: Editora Atheneu, 2003. 554p.

BARROS C. A; RODRIGUES, J. C.; BRITTO, G. M.; CUNHA, C. D.; RIZZO, A. C.; SOARES, P. S. M. Métodos para Tratamento Biológico de Drenagem Ácida de Mina-DAM. **CETEM/MCTI**, Rio de Janeiro, 39p. (Série Tecnologia Ambiental, 65), 2012. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1588/1/sta-65.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2022.

BHATTACHARYA, J.; JI, S. W.; LEE, H. S.; CHEONG, Y. W.; YIM, G. J.; MIN, J. S.; CHOI, Y. S. Treatment of acidic coal mine drainage: design and operational challenges of successive alkalinity producing systems. **Mine Water and the Environment**, 27, 12-19, 2008. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10230-007-0022-4>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

BROWN, M.; BARLEY, B.; WOOD, H. **Minewater Treatment, Technology, Application and Policy**. 1. ed. United Kingdom: IWA Publishing, 2002. 472 p.

BURNS, A. S.; PUGH, C. W.; SEGID, Y. T.; BEHUM, P. T.; LEFTICARIU, L.; BENDER, K. S. Performance and microbial community dynamics of a sulfate-reducing bioreactor treating coal generated acid mine drainage. **Biodegradation**, volume 23, pages 415-429, 2012. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10532-011-9520-y>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

BRUECKNER, M.; SPENCER, R.; KNOWLES, S.; PAULL, M. Mining legacies—Broadening understandings of mining impacts. **The Extractive Industries and Society**, volume 8, issue 3, september 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100950>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

CAMPOS, M. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência**, Guarapuava (PR), v.6 n.3 p.547 – 565, set./dez. 2010. ISSN 1808 – 0251. Disponível em:
<<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/591/1154>>. Acesso em: 01 mai 2023.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais | Apêndice D - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**. São Paulo, SP, 2013. 46 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Apendice-D-Significado-Ambiental-e-Sanitario-das-Variaveis-de-Qualidade-29-04-2014.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2023.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Superficiais | Apêndice E - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**. São Paulo, SP, 2018. 52 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2018/03/Apendice-E-Significado-Ambiental-e-Sanitario-das-Variaveis-de-Qualidade-2016.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2023.

CETESB. **Ficha de informação toxicológica – Divisão de toxicologia humana e saúde ambiental**. São Paulo, SP, 2017. 3 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Aluminio.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2023.

CETESB. **Ficha de informação toxicológica – Divisão de toxicologia humana e saúde ambiental**. São Paulo, SP, 2022. 4 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/Zinco.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2023.

CETESB. Cádmio e seus compostos. **Divisão de toxicologia humana e saúde ambiental**. São Paulo, SP, 2022. 4 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cadmio.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2023.

CETESB. Chumbo e seus compostos. **Divisão de toxicologia humana e saúde ambiental**. São Paulo, SP, 2022. 4 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Chumbo.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2023.

CHEN, J.; HSU, S.; LI, M.; LIU, C. Assessing the performance of a permeable reactive barrier–aquifer system using a dual-domain solute transport model. **Journal of Hydrology**, v.543, part B, December 2016, pages 849-860. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.002>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

CHRISTENSEN, B.; LAAKE, M.; LIEN, T. Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria; results from a bench scale experiment. **Water Research**, Volume 30, Issue 7, 1996, Pages 1617-1624. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(96\)00049-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(96)00049-8)>. Acesso em: 01 mai 2023.

CHRISTENSON, H.; POPE, J; TRUMM, D.; NEWMAN, N.; BLANCO, I.; KERR, G; YOUNG, M.; USTER, B. Manganese and trace element removal from New Zealand coal mine drainage using limestone leaching beds. **New Zealand Journal of Geology and Geophysics**, volume 62, feb 2019, pages 217 – 228. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00288306.2018.1540995>>. Acesso em: 05 set. 2023.

CFR – Code of Federal Regulations. Title 40 CFR 437.14. New source performance standards (NSPS). Disponível em: <<https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-1/subchapter-N/part-437/subpart-A/section-437.14>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430/2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em:

<https://www.saude.mg.gov.br/images/documentos/RE%20CONAMA%20403-2011_Lancamento%20de%20Efluentes.pdf>. Acesso em: 26 out 2023.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa Copam nº 116/2008. Dispõe sobre a declaração de informações relativas à identificação de áreas suspeitas de contaminação e contaminadas por substâncias químicas no Estado de Minas Gerais. *Diário do Executivo*: Belo Horizonte, MG, 28 jun. 2008. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=7974>>. Acesso em 26 out 2023.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa Copam nº 220/2018. Estabelece diretrizes e procedimentos para a paralisação temporária da atividade minerária e o fechamento de mina, estabelece critérios para laboração e apresentação do relatório de Paralisação da Atividade Minerária, do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas - PRAD e do Plano Ambiental de Fechamento de Mina - PAFEM e dá outras providências. **Diário do Executivo**: Belo Horizonte, MG, Caderno 1, p. 80, 28 mar. 2018. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45938>>. Acesso em 26 out 2023.

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental. CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Deliberação Normativa Conjunta Copam nº 08/2022. 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. **Diário do Executivo**: Belo Horizonte, MG, Caderno 1, p. 8, 02 dez. 2022. Disponível em: <<https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>>. Acesso em 31 jan 2024.

CRAFTON, E.; PRITCHARD, C. GUO, L.; SENKO, J. M.; CUTRIGHT, T. J. Dynamics of Mn removal in an acid mine drainage treatment system over 13 years after installation. **Environmental Earth Sciences**, 78, 10 (2019). Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s12665-018-8008-z>>. Acesso em: 01 mai 2023.

CUI, M.; JANG, M; CHO, S.; KHIM, J.; CANNON, F. A continuous pilot-scale system using coal-mine drainage sludge to treat acid mine drainage contaminated with high concentrations of Pb, Zn, and other heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**, volumes 215-216, 15 may 2012, pages 122-128. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.042>>. Acesso em: 05 ago. 2023.

CUNHA, M. P.; FERRAZ, R. M.; SANCINETTI, G. P.; RODRIGUEZ, R. P. Long-term performance of a UASB reactor treating acid mine drainage: effects of sulfate loading rate, hydraulic retention time, and COD/SO₄²⁻ ratio. *Biodegradation*, volume 30, pages 47-58, 08 november 2018. Disponível em: < <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10532-018-9863-8>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

DEAN, A. P.; LYNCH, S.; ROWLAND, P.; TOFT, B. D.; PITTMAN, J. K.; WHITE, K. N. Natural Wetlands Are Efficient at Providing Long-Term Metal Remediation of Freshwater Systems Polluted by Acid Mine Drainage. **Environmental Science & Technology**, 2013, 47, 21, 12029–12036. Disponível em: <<https://pubs-acsc-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1021/es4025904>>. Acesso em: 01 mai 2023.

DOLD, B. Acid rock drainage prediction: A critical review. **Journal of Chemical Exploration**, volume 172, January 2017, pages 120-132. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

Environmental Agency, 2023. **Cleaning up rivers polluted by abandoned metal mines**. Disponível em: <<https://environmentagency.blog.gov.uk/2023/02/07/cleaning-up-rivers-polluted-by-abandoned-metal-mines/>>. Acesso em 31 jan 2024.

EPA – U.S Environmental Protection Agency. **Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction**. Washington DC: EPA, 1994. 52 p.

Feam – Fundação Estadual do Meio Ambiente (2020) **Recuperação de Áreas de Mineração**. Disponível em: <<http://www.feam.br/recuperacao-de-areas-de-mineracao>>. Acesso em 26 out 2023.

FREITAS, A. E.; LEÃO, A. P. S.; GOMES, R. S.; STAIGER, R. P.; BORGES, G. M.; PINTO, F. C. S.; PESSOA, S. B. A.; SOUSA, I. V C. ESG: OS DESAFIOS DE UMA GESTÃO SUSTENTÁVEL. **Revista Foco**, v. 16, n 2, fevereiro 2023, páginas 01-15. Disponível em: <<https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/1119/846>>. Acesso em: 21 jan. 2024.

GALVÃO, M. C. B; RICARTE, I. L M. Revisão Sistemática da Literatura: Conceituação, produção e Publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, Rio de Janeiro, v. 6 n. 1, p.57-73, set.2019/fev. 2020. Disponível em: <<https://sites.usp.br/dms/wp-content/uploads/sites/575/2019/12/Revis%C3%A3o-Sistem%C3%A1tica-de-Literatura.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literature: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, 23 (1), Jan-Mar 2014. DOI: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742014000100018>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ress/a/yPKRNymgtzwwR8cpDmRWQr/?lang=pt>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

GANDY, C.; GRAY, N. D.; MEKEHA, O. K.; SHERRY, A.; JARVIS, A. P. Use of propionic acid additions to enhance zinc removal from mine drainage in short residence time, flow-through sulfate-reducing bioreactors. **Journal of Environmental Management**, volume 327, February 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116862>>. Acesso 12 mai. 2023.

GEMICI, U. Evaluation of the water quality related to the acid mine drainage of an abandoned mercury mine (Alaçehir, Turkey). **Environ Monit Assess**, 147(1-3):93-106, dec. 2008. doi: 10.1007/s10661-007-0101-9. Epub 2007 Dec 13. PMID:

18075780. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18075780/>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

Government of Canada. Metal and Diamond Mining Effluent Regulations - **SOR/2002-222**. Disponível em: <<https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2002-222/FullText.html>>. Acesso em 26 out 2023.

Government of Canada, 2022. **Mine Site Reclamation Policy for Nunavut**. Disponível em: <<https://www.rcaanc-cirnac.gc.ca/eng/1100100036042/1547658056831>>. Acesso em 31 jan 2024.

Government of Canada, 2022. **Mine closure, reclamation and monitoring - Information about the legislation and regulations related to mine closure**. Disponível em: <<https://www.rcaanc-cirnac.gc.ca/eng/1646321588912/1646321643743>>. Acesso em 26 out 2023.

GROUDEV, S.; GEORGIEV, P.; SPASOVA, I.; NICOLOVA, M. Bioremediation of acid mine drainage in a uranium deposit. **Hydrometallurgy**, volume 94, issues 1-4, november 2008, pages 93-99. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.023>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

HAMILTON, Q. U. I.; LAMB, H. M.; HALLETT, C.; PROCTOR, A. Passive Treatment Systems for the Remediation of Acid Mine Drainage at Wheal Jane, Cornwall. **Water and Environment Journal**, 13: 93-103 (1999). Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1747-6593.1999.tb01014.x>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

HEDIN, R.; WEAVER, T.; WOLFE, N.; WEAVER, K. Passive Treatment of Acidic Coal Mine Drainage: The Anna S Mine Passive Treatment Complex, **Mine Water and the Environment**, 29, 165-175 (2020). Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10230-010-0117-1>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

HU, X.; PENG, M.; SHENG, X.; SHI, H.; SHANG, J.; LIU, J.; YANG, L. SHAO, P.; LUO, X. HONG, M.; LIU, T. Continuous and effective treatment of heavy metal in acid mine drainage based on reducing barrier system: A case study in North China. **Journal of Hazardous Materials Advances**, volume 8, November 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100152>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. 2013. **Guia para planejamento e fechamento de mina**. Brasília, DF. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00004091.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. 2022. **Práticas em Circularidade no Setor Mineral**. Brasília, DF.

ICMM. **Integrated Mine Closure - Good Practice Guide**. London: International Council on Mining & Metals, 2nd edition, fev. 2019. Disponível em:

<<https://www.icmm.com/en-gb/guidance/environmental-stewardship/2019/integrated-mine-closure>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

IGHALO, J. O.; KURNIAWAN, S. B.; IWUOZOR, K. O.; ANIAGOR, C. O.; AJALA, O. J.; OBA, S. N.; IWUCHUKWU, F. U.; AHMADI, S.; IGWEGBE, C. A. A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). **Process Safety and Environmental Protection**, volume 157, january 2022, pages 37-58. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.008>>. Acesso em: 08 mai. 2023.

INAP – The International Network for Acid Prevention. **Global Acid Rock Drainage Guide**. GARD Guide, 2014. Disponível em: <http://www.gardguide.com/index.php?title=Main_Page>. Acesso em: 26 nov. 2022.

ISHIAKI, F. T.; YOSHIDA, C. Y. M. O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DAS ATIVIDADES MINERÁRIAS COMO INSTRUMENTO DE APLICAÇÃO DO PRINCÍPIO DA PREVENÇÃO. **Revista Argumentum**, Marília/SP, v. 21, n. 3, pp. 1219-1239, set-dez/2020. Disponível em: <<http://ojs.unimar.br/index.php/revistaargumentum/article/view/1410>>. Acesso em: 16 ago. 2023.

JALLATH, J. E. S; ROMERO, F. M.; ARGÜELLES, R. I.; MACEDO, A. C.; ARENAS, J. G. Acid drainage neutralization and trace metals removal by a two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico. **Environmental Earth Sciences**. Disponível em: <<https://link-springer-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s12665-018-7248-2>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. Acid Mine Drainage Remediation Options: A Review. **Science of the Total Environment**, v. 338, issues 1-2, pag. 2-14, feb. 2005. DOI 10.1016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>>. Acesso em: 31 out. 2022.

JORDAN, S.; REDINGTON, W.; HOLLAND, L. B. Remediation of Metal Contaminated Simulated Acid Mine Drainage Using a Lab-Scale Spent Mushroom Substrate Wetland. **Water, Air, & Soil Pollution**, volume 232, 18 may 2021. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11270-021-05158-4>>. Acesso em: 02 ago 2023.

KALIN, M.; CHAVES CAETANO, W. L. Acid reduction using microbiology: treating AMD effluent emerging from an abandoned mine portal. **Hydrometallurgy**, Volume 71, Issues 1–2, 2003, Pages 217-225. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00159-2)>. Acesso em: 01 mai. 2023.

KARIMIFARD, S.; MOGHADDAM M. R. A. Application of response surface methodology in physicochemical removal of dyes from wastewater: A critical review. **Science of The Total Environment**, volumes 640-641, 1 november 2018, pages 772-797. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.355>>. Acesso em: 06 set. 2023.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, volume 151, 10 may 2017, pages 475-493. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

KIISKILA J.D.; SARKAR D.; PANJA S.; SAHI S.V.; DATTA R. Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*): A multiscale long-term study. **Ecological Engineering**, volume 129, pages 97—108. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.018>>. Acesso em: 26 out 2023.

KIPERSTOK, A.; COELHO, A.; TORRES, E. A.; MEIRA, C. C.; BRADLEY, S. P.; ROSEN, M. **Prevenção da Poluição**. 1. ed. Brasília (DF). SENAI, 2002. 297 p.

KHORASANIPOUR, M.; MOORE, F.; NASEH, R. Lime Treatment of Mine Drainage at the Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine, Iran. **Mine Water and the Environment**, volume 30, february 2011, pages 216-230. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10230-011-0142-8>>. Acesso em 26 out 2023.

KISLIOGLU, M. S. Removal of Ag, Au, and As from Acid Mine Water Using Lemna gibba and Lemna minor—A Performance Analysis. **Water**, 15(7):1293, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w15071293>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

LEE, G.; HAN, J.; JANG, M.; KIM, M. Long-term treatment of acid mine drainage by alkali diffusion ceramic reactor: Simultaneous metal removal mechanisms. **Chemosphere**, volume 298, July 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134186>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

LOURENÇO; L.; CASTRO, A. N. F. V. **Catástrofes Mistas, uma perspectiva ambiental**. 1. ed. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2019. 60 p.

MACKIE, A. L.; Walsh M. E. Bench-scale study of active mine water treatment using cement kiln dust (CKD) as a neutralization agent. **Water Research**, v. 46, pages 327—334, feb. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.030>>. Acesso em 26 out. 2023.

MARTINS C. M.; DAMAN, D.; ROESER, H. M. P.; NALINI JR., H. A. Estudo Microbiológico Relacionado à Geração de Drenagem Ácida em Antigas Minas de Pirita no Município de Ouro Preto, MG. **Geochemical Brasiliensis**, v. 18, nº 2, mai 2004. DOI 10.21715. ISSN 2358-2812. Disponível em: <<https://geobrasiliensis.emnuvens.com.br/geobrasiliensis/article/view/213/pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MASINDI, V.; CHATZISYMEON, E.; KORTIDIS, I; FOTEINIS, S. Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa. **Science of The Total Environment**, volume 635, 1 september 2018, pages 793-802. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.108>>. Acesso em: 25 jun. 2023

MASINDI, V.; SHABALALA, A.; FOTEINIS, S. Passive co-treatment of phosphorus-depleted municipal wastewater with acid mine drainage: Towards sustainable wastewater management systems. **Journal of Environmental Management**, volume 324, 15 december 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116399>>. Acesso em: 04 out. 2023.

MATSUMOTO, S.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T. The Key Factor of Acid Mine Drainage (AMD) in the History of the Contribution of Mining Industry to the Prosperity of the United States and South Africa: A Review. **Natural Resources**, 7, 445-460 (2016). Disponível em: <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=68986>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

MATTHIES, R.; APLIN, A. C.; JARVIS, A. P. Performance of a passive treatment system for net-acidic coal mine drainage over five years of operation. **Science of The Total Environment**, volume 408, issue 20, 15 september 2010, pages 4877-4885. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.009>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

MELLO, J. W. V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, nº 8, p. 24-29 (2014). Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/06-CTN4.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2022.

MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE (MEND). Disponível em:<<https://mend-nedem.org/default/>>. Acesso em: 20 mar 2024.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Repositório do Conhecimento do IPEA (RCIPEA), boletim regional, urbano e ambiental**, Brasília, n 16, p. 95 - 103, jan. - jun. 2017. ISSN 2177-1847. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/porta1/images/stories/PDFs/boletim_regional/170531_bru_16.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2022.

MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. **Decreto 90**. Establece norma de emision para la regulacion de contaminantes asociados a las descargas de residuos liquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Santiago, 30 de mayo de 2000. Disponível em: <<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>>. Acesso em: 26 jan. 2024.

MORAES, N. C; SILVA, J. M.; MOTA, H. L. Uso de entulho de construção civil como sistema de cobertura para abatimento de drenagem ácida de mina em uma mina abandonada de pirita. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, pp. 213-218, jun 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000200013>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MOTHETHA M.; KEBEDE, K.; MASINDI, V.; MSAGATI, T. A. M. Effective treatment of real acid mine drainage using MgO-metakaolinite nanocomposite. **Journal of Water Process Engineering**, volume 51, February 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103370>>. Acesso em: 12 mai 2023.

MULOPOO, J. Active Physical Remediation of Acid Mine Drainage: Technologies Review and Perspectives. **Journal of Ecological Engineering**, volume 25, issue 6, pages 148-163, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.12911/22998993/147409>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

MURRAY J.; NORDSTROM, D.; DOLD, B.; KIRSCHBAUM, A. Seasonal fluctuations and geochemical modeling of acid mine drainage in the semi-arid Puna region: The Pan de Azúcar Pb-Ag-Zn mine, Argentina. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 109, aug. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103197>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MUSTHAFI, O. M.; CHABIB, C. M.; MUSTAFA, I.; GHAFERI, A. A.; ALMARZOOQI, F. Brine management in desalination industry: From waste to resources generation. **Desalination**, volume 472, 15 december 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114187>>. Acesso em> 06 set. 2023.

NAIDU, G.; RYU, S.; THIRUVENKATACHARI, R; CHOI, Y.; JEONG, S.; VIGNESWARAN, S. A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. **Environmental Pollution**, volume 247, april 2019, pages 1110-1124. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.085>>. Acesso em: 12 mai 2023.

NECULITA, C. M.; ZAGURY, G. J. Biological treatment of highly contaminated acid mine drainage in batch reactors: Long-term treatment and reactive mixture characterization. **Journal of Hazardous Materials**, volume 157, issues 2-3, September 2008, pages 358-366. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.002>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

NEXA RESOURCES. Relatório Annual 2022. Disponível em: <https://www.nexaresources.com/wp-content/uploads/2023/05/RA_Nexa_2022_v11_FINAL_SITE.pdf>. Acesso em: 21 jan 2024.

NOOR, I. ARIFIN, Y. F.; PRIATMADI, B. J.; SAIDY, A. R. Laboratory simulation of the swampy forest system for the passive treatment of acid mine drainage in coal mine reclamation áreas. **Nature**, ci Rep 13, 6077 (2023). Disponível em: < <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-023-32990-x>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

ORDEN, S.; MACÍAS, F.; CÁNOVAS, C. R.; NIETO, J. M.; PÉREZ-LOPEZ, R. AYORA, C. Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration. **Journal of Environmental Management**, volume 280, 15 february 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111699>>. Acesso em: 01 ago. 2023.

ORTH, A.; CORDELLA, R. O.; BARBORA, P. R. M.; MIGUEL, T. F.; MENEGARO, D. A.; DOMINGUINI, L.; FERNANDES, M.; SKORONSKI, E. Aplicação da água de drenagem ácida de mina na recuperação de sulfato de alumínio em lodo de ETA. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis/SC, 19 de outubro de

2014. Disponível

em:<<https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0225-26456-180011.pdf>>. Acesso em: 20 mar 2024.

PARK, I. TABELIN, C. B.; JEON, S. LI, X.; SENO, K.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. **Chemosphere**, volume 219, march 2019, pages 688-606. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

PENG, C.; JIN, R.; LI, G.; LI, F.; GU, Q. Recovery of nickel and water from wastewater with electrochemical combination process. **Separation and Purification Technology**, volume 136, 5 november 2014, pages 42-49. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.025>>. Acesso em: 06 set. 2023.

PETERSON, M.; CARDOSO, K. A.; PELISSER, F. Utilização do Lodo de Drenagem Ácida da Mineração de Carvão em Cerâmica Vermelha. **1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**. Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=9&ano=_primeiro>. Acesso em 20 mar 2024.

QIN, J.; CUI, X.; YAN, H.; LU, W.; LIN, C. Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, pages 309-316. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.029>>. Acesso em 26 out 2023.

RAMBABU, K.; BANAT, F.; PHAM, W. M.; HO, S.; REN, N.; SHOW, P. L. Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. **Environmental Science and Ecotechnology**, volume 2, april 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100024>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

RAYMOND, P. A.; OH, NH. Long term changes of chemical weathering products in rivers heavily impacted from acid mine drainage: Insights on the impact of coal mining on regional and global carbon and sulfur budgets. **Earth and Planetary Science Letters**, volume 284, issues 1-2, 30 june 2009, pages 50-56. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.04.006>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

REY, V. RÍOS; C. A.; VARGAS, L. Y.; VALENTE, T. M. Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings. **Journal of Geochemical Exploration**, volume 22, january 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106660>>. Acesso em: 05 set. 2023.

ROBERTSON, S.; KRISTEN B.C. (Inc.). **British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Report**. vol. 1 Vancouver: Canadian Cataloguing in Publication Data, 1989. 274 p.

ROYCHOWDHURY, A.; SARKAR, D.; DATTA, R. Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. **Current Pollution Reports**, volume 1, pages 131-141, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40726-015-0011-3>>. Acesso em: 12 mai. 2023.

ROYCHOWDHURY, A.; SARKAR, D.; DATTA, R. Removal of Acidity and Metals from Acid Mine Drainage-Impacted Water using Industrial Byproducts.

Environmental Management, volume 63, pages 148-158, 2019. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00267-018-1112-8>>. Acesso em: 11 out. 2023.

RÖTTING, T. S.; CARABALLO, M. A.; SERRANO, J. A.; AYORA, C.; CARRERA, J. Field application of calcite Dispersed Alkaline Substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations. **Applied Geochemistry**, volume 23, issue 6, June 2008, pages 1660-1674. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.023>>. Acesso em: 01 mai 2023.

SALDANHA, D. S.; COSTA, D. F. da S. Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 13, n. 3, p. 263-282, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/ateliê/article/view/54443>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

SÁNCHEZ, L.E.; SILVA-SÁNCHEZ, S.S.; NERI, A.C. **Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2013. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00004091.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

SCHWARZ, A.; PÉREZ, N. Long-term operation of a permeable reactive barrier with diffusive exchange. **Journal of Environmental Management**, volume 284, 15 april 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112086>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

SHIM, M. J.; CHOI, B. Y.; LEE, G.; HWANG, Y. H.; YANG, J-S.; O'LOUGHLIN; KWON, M. J. Water quality changes in acid mine drainage streams in Gangneung, Korea, 10 years after treatment with limestone. **Journal of Geochemical Exploration**, volume 159, December 2015, pages 234-242. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.09.015>>. Acesso em: 01 mai 2023.

SIERRA, C.; SAIZ, J. R. A.; GALLEGO, J. L. R. Nanofiltration of Acid Mine Drainage in an Abandoned Mercury Mining Area. **Water, Air, & Soil Pollution**, 224, 1734 (2013). Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11270-013-1734-7>>. Acesso em: 01 mai 2023.

SIMMONS, J.; ZIEMKIEWICZ, P.; BLACK, D. C. Use of Steel Slag Leach Beds for the Treatment of Acid Mine Drainage. **Mine Water and the Environment**, 21, 91–99 (2002). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s102300200024>>. Acesso em: 01 mai 2023.

SUN, R.; LI, U. LIN, N.; OU, C. WANG, X.; ZHANG, L. JIANG, F. Removal of heavy metals using a novel sulfidogenic AMD treatment system with sulfur reduction: Configuration, performance, critical parameters and economic analysis.

Environment International, volume 136, march 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105457>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

TABELIN, C.; SASAKI, A; IGARASHI, T; TOMIYAMA, S; VILLACORTE-TABELIN, M; ITO, M; HIROYOSHI, N. Prediction of acid mine drainage formation and zinc migration in the tailings dam of a closed mine, and possible countermeasures. **MATEC Web Conf.** v. 268, 06003 (2019). Trabalho apresentado no 25º Simpósio Regional de Engenharia Química (RSCE 2018), Makati City, Philippines. Disponível em: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/17/mateconf_rsce18_06003/mateconf_rsce18_06003.html>. Acesso em: 03 dez. 2022.

TORRES, E. LOZANO, A.; MACÍAS, F.; GOMEZ-ARIAS, A.; CASTILLO, J.; AYORA, C. Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems. **Journal of Cleaner Production**, volume 182, may 2018, pages 114-123. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.224>>. Acesso em: 05 set. 2023.

UNDERWOOD, B. E.; KRYSE, N. A.; BOWMAN, J. R. Long-term chemical and biological improvement in an acid mine drainage-impacted watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, volume 186, pages 7539-7553, 26 July 2014. Disponível em: <<https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10661-014-3946-8>>. Acesso em: 02 ago. 2023.

VIADERO JR, R. C.; ZHANG, S.; HU, X.; WEI, X. Mine drainage: Remediation technology and resource recovery. **Water Environment Federation**, 92, pages 1533-1540, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/epdf/10.1002/wer.1401>>. Acesso em: 12 mai 2023.

VIEIRA, E. A. A (in)sustentabilidade da indústria da mineração no Brasil. **Estação Científica (UNIFAP)**, Macapá, v. 1, n. 2, p. 01-15, 2011. ISSN 2179-1902. Disponível em: <<https://periodicos.unifap.br/index.php/estacao/article/view/248>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

VOLPATO, S. B.; CRESCENCIO A; DE MENEZES C. T. B.; ESCOBAR, A. Treatment of acid effluents for the removal of manganese and heavy metals associated with effluents from the coal mining through the processes of flocculation and flotation by dissolved air. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 55, pages 536-551. Disponível em: <<https://doi.org/10.5327/z2176-947820200632>>. Acesso em: 26 out 2023.

WANG Z.; XU, Y.; ZHANG, Z.; ZHANG, Y. Review: Acid Mine Drainage (AMD) in Abandoned Coal Mines of Shanxi, China. **Water**, 2021, 13, 8. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w13010008>>. Acesso em: 13 nov. 2022.

WHITEHEAD, P. G.; COSBY, B. J; PRIOR, H. The Wheal Jane wetlands model for bioremediation of acid mine drainage. **Science of The Total Environment**, Volume 338, Issues 1-2, 1 February 2005, pages 125 -135. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.012>>. Acesso em: 01 mai 2023.

WIBOWO, Y. G.; SAFITRI, H.; MILIK, I. B. I.; SUDIBYO; PRIYANTO, S. Alternative Low-Cost Treatment for Real Acid Mine Drainage: Performance, Bioaccumulation, Translocation, Economic, Post-Harvest, and Bibliometric Analyses. **Sustainability**, 2022, 14, 15401. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su142215404>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

YABUKI L. N. M.; NOGUEIRA, E. W.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; MENEGÁRIO, A. A.; GARCIA, M. L. Monitoramento e Remoção de Metais em um Reator Anaeróbio Aplicado ao Tratamento de Drenagem Ácida de Mina. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14(4), p. 389-401, out. 2020. Disponível em: <<https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/956/482>>. Acesso em: 31 out. 2022.

ZHANG, X.; YE, C.; HUANG, J.; XIA, M.; GERSON, A. R. Sustainable treatment of desulfurization wastewater by ion exchange and bipolar membrane electrodialysis hybrid technology. **Separation and Purification Technology**, volume 211, 18 march 2019, pages 330-339. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.003>>. Acesso em: 06 set. 2023.

APÊNDICE A – Tabela de Revisão de Literatura

Nome do Artigo	Autor(es)	Ano	Tipo de Minério	Tipo de Tratamento	Descrição do Tratamento	Escala	Nacional ou Internacional	País do Estudo	Periódico	Caracterização do efluente bruto?	Caracterização do efluente tratado?
In- situ treatment of sulfide minerals to reduce acid drainage	Bloom; Jennings; Bisque	1969	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NEUTRALIZATION AND AERATION OF ACID MINE WATERS	Harrison, VF	1969	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abatement procedure related to acid mine drainage	Wayman, CH	1969	-	-	-	-	-	-	-	-	-
The effect of limestone treatments on the rate of acid generation from pyritic mine gangue	Burt, Caruccio	1986	Ouro	Passivo	Promoção da lixiviação em solução de calcário	Piloto	Internacional	United States	Environmental Geochemistry and Health	Não	Não
A Comparison of Eichhornia crassipes (Pontederiaceae) and Sphagnum quinquefarium (Sphagnaceae) in treatment of acid mine water	Falbo, Weaks	1990	Carvão	Biológico	Zona alagada com plantas aquáticas	Bancada	Internacional	United States	Economic Botany	Não	Não
Ecological engineering methods for acid mine drainage treatment of coal wastes	Kalin; Cairns; McCreedy	1991	Cobre-zinco e carvão	Passivo	Microorganismos geradores de alcalinidade em wetlands	Real	Internacional	Canada	Resources, Conservation and Recycling	Sim	Não
Treatment of water from an open-pit copper mine using biogenic sulfide and limestone: A feasibility study	Hammack; Edenborn; Dvorak	1994	Cobre	Passivo/Biológico	Adição de calcário e sulfeto biogênico (reator e biorreator SRB)	Bancada	Internacional	United States	Water Research	Não	Não
Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria; results from a bench scale experiment	Christensen; Laake; Lien	1996	Cobre-zinco	Biológico	SRB em cilindros com leito de areia e camada de brita ao fundo	Bancada	Internacional	Norway	Research (Oxford)	Sim	Não
Metal species indicate the potential of constructed wetlands for long-term treatment of metal mine drainage	Sobolewski	1996	Cobre	Passivo	Wetlands experimentais com turfa (material orgânico)	Piloto	Internacional	Canada	Ecological Engineering	Não	Não
Growth of sulfate-reducing bacteria under acidic conditions in an upflow anaerobic bioreactor as a treatment system for acid mine drainage	Elliott; Ragussa; Catcheside	1998	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Biorreator de meio poroso de fluxo ascendente (SRB)	Bancada	Internacional	Australia	Water Research	Não	Não
An integrated algal sulphate reducing high rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters	Rose <i>et al.</i>	1998	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Lagoas de algas de alta taxa (sedimentação de lama sulfetada em compartimento anaeróbio de uma lagoa facultativa - SRB)	Bancada Piloto	Internacional	Netherlands	Biodegradation	Sim	Sim
Metal removal efficiencies of substrates for treating acid mine drainage of the Dalsung mine, South Korea	Cheong; Min; Kwon	1998	Tungstênio	Passivo	Reator anaeróbio de fluxo ascendente (SRB)	Piloto	Internacional	South Korea	Journal of Geochemical Exploration	Sim	Sim
The selective oxide system™: Acid drainage treatment that avoids the formation of sludge	Diz	1998	-	Ativo	Biorreator para oxidação, reator de leito fluidizado para precipitação e filtro biológico pra oxidação e precipitação	Projeto	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Não	Não
Selection of Reactive Mixtures for Use in Permeable Reactive Walls for Treatment of Mine Drainage	Waybrant; Blownes; Ptacek	1998	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Barreiras Permeáveis com Misturas Reativas	Bancada	Internacional	Canada	Environmental Science & Technology	Sim	Não
Fluidized Bed for Removing Iron and Acidity from Acid Mine Drainage	Diz; Novak	1998	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo/Biológico	Biorreator + Reator de leito fluidizado (FBR)	Bancada	Internacional	United States	Journal of Environmental Engineering	Sim	Não
Water quality, fate of metals, and predictive model validation of a constructed wetland treating acid mine drainage	Mitsch; Wise	1998	-	Passivo	Wetlands	Real	Internacional	United States	Water Research	Sim	Sim
The removal of sulfate and metals from mine waters using bacterial sulfate reduction: Pilot plant results	Hammacl; Vegt; Schoeneman	1998	Cobre e Ouro	Biológico	Planta de SRB (reator UASB)	Piloto	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Sim	Sim
Treatment of Acid Mine Drainage with Anaerobic Solid-Substrate Reactors	Drury	1999	Cristal	Biológico	Reatores contendo SRB	Bancada	Internacional	United States	Water Environmental Research	Não	Não
Passive Treatment Systems for the Remediation of Acid Mine Drainage at Wheal Jane, Cornwall	Hamilton <i>et al.</i>	1999	Estanho	Passivo	Planta de Tratamento Passivo	Piloto	Internacional	England	Water and Environmental Journal	Não	Não
Laboratory investigation of the control of acid mine drainage using alkaline paper mill waste	Bellaloui <i>et al.</i>	1999	Cobre	Passivo	Resíduos alcalinos de fábrica de papel (testes de lixiviação em colunas)	Bancada	Internacional	Canada	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Não
A continuous process for the biological treatment of heavy metal contaminated acid mine water	Hille <i>et al.</i>	1999	Cobre, Chumbo e Zinco	Biológico	Sistema contínuo de precipitação de metais pesados (alga Spirulina) via reator	Bancada	Internacional	South Africa	Resources, Conservation and Recycling	Sim	Sim
Efeito da compactação e CaCO ₃ na oxidação da pirita em estéril de mineração de carvão	Soares <i>et al.</i>	2000	Carvão	Passivo	Compactação do estéril e adição de CaCO ₃	Bancada	Nacional	Brasil	Revista Brasileira de Ciência do Solo	Não	Não
Biological treatment of acid mine drainage under sulphate-reducing conditions with solid waste materials as substrate	Chang; Shin; Ki	2000	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Testando composto usado de cogumelos como doador de elétrons para as SRB	Bancada	Internacional	Japan	Water Research	Sim (efluente sintético)	Não
Treatment of acid mine drainage: I. Equilibrium biosorption of zinc and copper on non-viable activated sludge	Utgikar <i>et al.</i>	2000	Cobre (efluente sintético)	Biológico	Lodo ativado de estação de tratamento de efluente doméstico	Bancada	Internacional	United States	International Biodeterioration & Biodegradation	Não	Não
Magnetic Seed in Ambient Temperature Ferrite Process Applied to Acid Mine Drainage Treatment	McKinnon <i>et al.</i>	2000	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Sementes magnéticas	Bancada	Internacional	Canada	Environmental Science & Technology	Sim	Sim
SAND-SIZED LIMESTONE TREATMENT OF STREAMS IMPACTED BY ACID MINE DRAINAGE	Menendez <i>et al.</i>	2000	-	Passivo	Adição de calcário ao fluxo de riachos poluídos com AMD	Real	Internacional	United States	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Sim
Desenvolvimento de um sulfato redutor Biológico Processo Para Remover Pesado Metais da Drenagem Ácida de M	Steed <i>et al.</i>	2000	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Reator UASB, reator de filtro compactado e reator de filtro parcialmente compactado com manta de plástico para remoção dos metais e sólidos	Bancada	Internacional	United States	Water Environmental Research	Sim	Não
Design Criteria and Required Chemistry for Removing Manganese in Acid Mine Drainage Using Subsurface Flow Wetlands	Sikora <i>et al.</i>	2000	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Wetlands de leito de cascalho de fluxo subterrâneo	Piloto	Internacional	United States	Water Environmental Research	Sim	Sim
Field Investigation of Controlling Acid Mine Drainage Using Alkaline Paper Mill Waste	Chitaini <i>et al.</i>	2001	Ouro	Ativo	Células de demonstração compostas por resíduos alcalinos de fábrica de papel	Piloto	Internacional	Canada	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Sim
Use of Steel Slag Leach Beds for the Treatment of Acid Mine Drainage	Simmons; Ziemkiewicz; Black	2002	Carvão	Passivo	Leitos de lixiviação de escória siderúrgica (barragens de contenção abaixo de bacias de sedimentação)	Real	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Sim	Sim
Treatment of Mine Drainage Using Permeable Reactive Barriers: Column Experiments	Waybrant; Ptacek; Blowes	2002	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Barreira reativa permeável	Laboratório	Internacional	Canada	Environmental Science & Technology	Sim	Não
Inhibition of acid rock drainage from uranium ore waste using a conventional neutralization and precipitation treatment	Mata <i>et al.</i>	2002	Urânio	Ativo	Irrigação de escória com reagentes neutralizantes e precipitantes	Laboratório	Internacional	Spain	Minerals Engineering	Não	Não
Advances in Biotreatment of Acid Mine Drainage and Biorecovery of Metals: 2. Membrane Bioreactor System for Sulfate Reduction	Tabak. Govind	2003	Cobre	Biológico	Biorreator de membrana de fibra oca de polopropileno (biofilmes de SRB consumidoras de oxigênio)	Piloto	Internacional	United States	Biodegradation	Sim	Sim
Removal of Arsenic from Synthetic Acid Mine Drainage by Electrochemical pH Adjustment and Coprecipitation with Iron Hydroxide	Wang; Bejan; Bunce	2003	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Redução eletroquímica de H ⁺ a hidrogênio elementar via elevação de pH	Laboratório	Internacional	Canada	Environmental Science & Technology	Sim	Sim
Electrochemical remediation of acid mine drainage	Chartrand; Bunce	2003	Ferro e Níquel	Ativo	Tratamento eletroquímico (eletrólise via membrana da troca iônica)	Laboratório	Internacional	Canada	Journal of applied electrochemistry	Não	Não
Acid reduction using microbiology: treating AMD effluent emerging from an abandoned mine portal	Kalin; Chaves	2003	Ouro	Biológico	Quatro lagoas de oxidação-precipitação-decantação e três lagoas de tratamento microbiano operando em série	Real	Nacional	Brasil	Hydrometallurgy	Não	Não
Size and Performance of Anoxic Limestone Drains to Neutralize Acidic Mine Drainage	Cravotta	2003	Carvão	Passivo	Drenos subterrâneos de calcário anóxico	Laboratório/Real	Internacional	United States	Journal of Environmental Quality	Sim	Sim

A Bauxsol™-based Permeable Reactive Barrier for the Treatment of Acid Rock Drainage	Munro; Clark; McConchie	2004	Ouro	Passivo	Barreira reativa permeável bauxsol TM (lama vermelha neutralizada com água do mar + areia - subproduto do refino do alumínio)	Piloto	Internacional	Australia	Mine Water and the Environment	Sim	Sim
Acid neutralization within limestone sand reactors receiving coal mine drainage	Watten; Sibrell; Schwartz	2005	Efluente de uma estação de tratamento de AMD	Ativo	Reatores de Leito de Calcário Pulsado	Laboratório e Piloto	Internacional	United States	Environmental Pollution	Sim	Sim
A Bench-scale Assessment of a Combined Passive System to Reduce Concentrations of Metals and Sulphate in Acid Mine Drainage	Champagne; Geel; Parker	2005	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Sistema combinado de fluxo vertical (bacia de oxidação/precipitação, biofiltro de turfa; biorreator SRB e dreno de calcário anóxico)	Bancada	Internacional	Canada	Mine Water and the Environment	Sim	Não
Anaerobic Bioremediation of Acid Mine Drainage using Emulsified Soybean Oil	Lindow; Borden	2005	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Coluna de escoamento como camadas de óleo de soja, substratos solúveis e inóculo microbiano	Bancada	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Não	Não
The Wheal Jane wetlands model for bioremediation of acid mine drainage	Whitehead; Cosby; Prior	2005	-	Passivo	Usina de tratamento piloto de três sistemas contendo canteiros aeróbicos, células anaeróbicas e filtros de rocha, com três pré-tratamentos distintos para aumentar o pH	Piloto	Internacional	England	Science of the Total Environment	Não	Não
Evaluation of in situ layers for treatment of acid mine drainage: A field comparison	Hulshof; Sopra; Gould	2006	Rejeito metalúrgico rico em pirita e pirrotita	Passivo	Tratamento reativo em camadas com compostos de carbono orgânico (lacas de madeira e resíduos de celulose) mediado por BRS	Piloto	Internacional	Canada	Water Research	Não	Não
Exploration of remediation of acid rock drainage with clinoptilolite as sorbent in a slurry bubble column for both heavy metal capture and regeneration	Cui; Li; Grace	2006	-	Ativo	Coluna de bolhas de pasta de Plexiglas de laboratório com partículas naturais de clinoptilolita como sorvente	Laboratório	Internacional	Canada	Water Research	Sim	Não
Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron	Sontomartino; Webb	2007	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Dreno de Calcário	Laboratório	Internacional	-	Applied Geochemistry	Sim	Não
Treatment of acidic coal mine drainage: design and operational challenges of successive alkalinity producing systems	Bhattacharya et al.	2007	Carvão	Passivo	Sistemas sucessivos produtores de alcalinidade (pond de oxidação, lagoa anaeróbia e um pond pequeno)	Real	Internacional	Korea	Mine Water and the Environment	Não	Não
Biological Source Treatment of Acid Mine Drainage Using Microbial and Substrate Amendments: Microcosm Studies	Jin; Fallgren; Morris; Gossard	2008	Carvão	Biológico	Consórcio de SRB a partir de resíduos sólidos de indústria de laticínios como substrato	Bancada	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Não	Não
Treatment of Acid Mine Drainage by Sulphate-reducing Bacteria Using Low Cost Matrices	Costa <i>et al.</i>	2008	Ferro	Biológico	Biorreatores de coluna de leito empacotado (SRB)	Bancada	Internacional	Portugal	Water, Air, And Soil Pollution	Não	Não
Passive Treatment of Acid Mine Drainage with High Metal Concentrations Using Dispersed Alkaline Substrate	Rötting <i>et al.</i>	2008	Prata	Passivo	Substrato alcalino disperso (agente alcalino de granulação fina misturado com material inerte e grosseiro)	Laboratório	Internacional	Spain	Heavy metal in the environment	Sim	Não
Biological treatment of highly contaminated acid mine drainage in batch reactors: Long-term treatment and reactive mixture characterization	Neculita; Zagury	2008	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	reatores passivos contendo SRB com 4 substratos diferentes (lascas de madeira de bordo, serragem de bordo, estrume de aves compostado, composto de turfa)	Bancada	Internacional	Canada	Journal of Hazardous Materials	Sim	Não
Bioassessment of a combined chemical–biological treatment for synthetic acid mine drainage	Pagnanelli et al.	2008	Efluente sintético gerado em laboratório	Químico-Biológico	Tratamento combinado com uma coluna de precipitação química por calcário e refinamento biológico por SRB	Bancada	Internacional	Italy	Journal of Hazardous Materials	Sim	Não
Field application of calcite Dispersed Alkaline Substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations	Rötting <i>et al.</i>	2008	Pirita	Passivo	Tanque de substrato alcalino disperso (camadas de areia e cascas de madeira)	Piloto	Internacional	Spain	Applied Geochemistry	Sim	Sim
Bioremediation of acid mine drainage in a uranium deposit	Groudev <i>et al.</i>	2008	Urânio	Passivo	Zonas úmidas naturais e construídas, drenos de calcário alcalinizante, multibarreiras reativas permeáveis e um filtro de rocha, usados separadamente ou em diferentes combinações	Real	Internacional	Bulgaria	Hydrometallurgy	Sim	Sim
Role of sulfur-reducing bacteria in a wetland system treating acid mine drainage	Riefler <i>et al.</i>	2008	-	Biológico	Unidades sucessivas de produção de alcalinidade (uma bacia de contenção, três bacias anaeróbicas de fluxo vertical e duas lagoas anaeróbicas de fluxo superficial)	Real	Internacional	United States	Science of the Total Environment	Não	Não
Treatment of combined acid mine drainage (AMD)—Flotation circuit effluents from copper mine via Fenton's process	Mahiroglu; Tarlan-Yel; Sevimli	2009	Cobre	Ativo	Processo de oxidação de Fenton combinado com efluentes de flotação	Bancada	Internacional	Turkey	Journal of Hazardous Materials	Sim	Não
Field multi-step limestone and MgO passive system to treat acid mine drainage with high metal concentration	Carballo <i>et al.</i>	2009	Chumbo e Zinco	Passivo	Planta Piloto de remediação completa de calcário e MgO-DAS	Piloto	Internacional	Spain	Applied Geochemistry	Sim	Sim
A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage	Nyquist; Greger	2009	Zinco, Cobre e Chumbo	Passivo	Wetlands de fluxo superficial	Piloto	Internacional	Sweden	Ecological Engineering	Sim	Não
Utility of Eucalyptus tereticornis (Smith) bark and Desulfotomaculum nigrificans for the remediation of acid mine drainage	Chockalingam; Subramanian	2009	Pirita	Biológico	Casca de eucalipto como biossorvente na remoção de íons metálicos de águas ácidas de minas e o filtrado da casca como sustrato para a reprodução de SRB (redução de sulfato)	Laboratório	Internacional	India	Bioresource Technology	Não	Não
The use of passive treatment alternatives for the mitigation of acidic drainage at the Williams Brother mine, California: Bench-scale study	Clyde; Champagne; Jamieson	2010	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Coluna de turfa seguida de drenos anóxicos de calcário; coluna de SRB seguida por DAC e coluna de SRB	Bancada	Internacional	United States	Applied Geochemistry	Sim	Sim (valores médios)
Passive Treatment of Acidic Coal Mine Drainage: The Anna S Mine Passive Treatment Complex	Hedin <i>et al.</i>	2010	Carvão	Passivo	Lagoas de fluxo vertical (sistema de produção de alcalinidade sucessiva)	Real	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Sim	Sim
Biotreatment of acidic zinc- and copper-containing wastewater using ethanol-fed sulfidogenic anaerobic baffled reactor	Sahinkaya; Yucesoy	2010	Cobre e Zinco	Biológico	Reator anaeróbio de quatro estágios - SRB alimentado com etanol	Laboratório	Internacional	Turkey	Bioprocess and Biosystems Engineering	Não	Não
Performance of a passive treatment system for net-acidic coal mine drainage over five years of operation	Matthies; Aplin; Jarvis	2010	Carvão	Passivo	Dois sistemas paralelos de redução e produção de alalinidade e uma bacia aeróbica	Real	Internacional	England	Science of the Total Environment	Sim	Não
Manganese and Sulfate Removal from a Synthetic Mine Drainage Through Pilot Scale Bioreactor Batch Experiments	Karathanasis; Edwards; Barton	2010	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Diversos substratos inorgânicos e orgânicos (biosólidos, palha de madeira, purê de milho, óleo de soja e xarope de sorgo) para a remoção de Mn por redução de sulfato usando biorreatores em escala de laboratório	Bancada	Internacional	United States	Mine Water and the Environment	Não	Não
Organic substrates in bioremediation of acidic saline drainage waters by sulfate-reducing bacteria	Sanitni; Degens; Rate	2010	-	Biológico	Misturas reativas de substratos orgânicos (resíduos de origem local) para neutralizar o pH e promover a atividade de SRB	Bancada	Internacional	Australia	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Não
Novel Passive Co-Treatment of Acid Mine Drainage and Municipal Wastewater	Strosnider; Winfrey; Nairn	2011	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Reator de fluxo contínuo em quatro estágios em co-tratamento passivo de DAM e águas residuais municipais	Laboratório	Internacional	United States	Journal of Environmental Quality	Sim	Não
Sulfidogenic biotreatment of synthetic acid mine drainage and sulfide oxidation in anaerobic baffled reactor	Bekmezci <i>et al.</i>	2011	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Reator anaeróbio defletor alimentado com redução de sulfato	Laboratório	Internacional	Turkey	Journal of Hazardous Materials	Não	Não
Acid neutralization by dissolution of alkaline paper mill wastes and implications for treatment of sulfide-mine drainage	Pérez-López <i>et al.</i>	2011	-	Ativo	Uso de resíduos de fábricas de papel como aditivo alcalino	Laboratório	Internacional	Spain	American Mineralogist	Sim	Não
Lime Treatment of Mine Drainage at the Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine, Iran	Khorasanipour; Moore; Naseh	2011	Cobre	Ativo	Adição de pasta de cal como etapa de estação de tratamento de efluente convencional	Laboratório/Real	Internacional	Iran	Mine Water and the Environment	Sim	Sim

Remediation of coal-mine drainage by a sulfate-reducing bioreactor: A case study from the Illinois coal basin, USA	Behum <i>et al.</i>	2011	Carvão	Biológico	Biorreator anaeróbico de redução de SO4	Laboratóro	Internacional	United States	Applied Geochemistry	Não	Não
Mining acid rock passive treatment for closure of a lignite mine in Spain: Achieving necessary water quality for discharge into lakes and drinking water reservoirs	Matos; Zhang	2011	Carvão	Passivo	Wetland de compostagem seguido de dreno de calcário anóxico (sistemas produtores de alcalinidade)	Real	Internacional	Portugal	Lakes & Reservoirs	Não	Não
In-situ remediation of acid mine drainage using a permeable reactive barrier in Aznalcóllar (Sw Spain)	Gibert <i>et al.</i>	2011	Pirita	Biológico	Barreira reativa permeável subterrânea composta por mistura de calcário e composto vegetal (SRB)	Real	Internacional	Spain	Journal of Hazardous Materials	Não	Não
Performance and microbial community dynamics of a sulfate-reducing bioreactor treating coal generated acid mine drainage	Burns <i>et al.</i>	2011	Carvão	Biológico	Biorreator de redução de sulfato de fluxo passivo	Real	Internacional	United States	Biodegradation	Não	Não
Induction of a geochemical barrier for As, Fe and S immobilization in a sulfide substrate	Assis <i>et al.</i>	2012	Ouro	Passivo	Barreira Geoquímica	Bancada	Nacional	Brasil	Revista Brasileira de Ciência do Solo	Não	Não
Pilot-scale passive bioreactors for the treatment of acid mine drainage: Efficiency of mushroom compost vs. mixed substrates for metal removal	Song <i>et al.</i>	2012	-	Biológico	Biorreatores passivos com mistura de quatro substratos (esterco de vaca, composto de cogumelo, serragem e palha de arroz) comparado ao compoto de cogumelos sozinho	Piloto	Internacional	South Korea	Journal of Environmental Management	Sim	Não
Bench-scale study of active mine water treatment using cement kiln dust (CKD) as a neutralization agent	Mackie; Walsh	2012	Chumbo e Zinco	Passivo	Uso de pó de forno de cimento	Bancada	Internacional	Canada	Water Research	Sim	Sim
Capacity of Wood Ash Filters to Remove Iron from Acid Mine Drainage: Assessment of Retention Mechanism	Genty <i>et al.</i>	2012	-	Passivo	Filtros de cinzas de madeira como etapa de polimento após tratamento com SRB	Laboratório	Internacional	Canada	Mine Water and the Environment	Não	Não
A continuous pilot-scale system using coal-mine drainage sludge to treat acid mine drainage contaminated with high concentrations of Pb, Zn, and other heavy metals	Cui <i>et al.</i>	2012	Chumbo e Zinco	Ativo	Sistema de tratamento consistindo de um reator tanque de agitação contínua, tanque de decantação e filtro de areia	Piloto	Internacional	South Korea	Journal of Hazardous Materials	Sim	Sim
Use of steel slag to neutralize acid mine drainage (AMD) in sulfidic material from a uranium mine	Leite; Cardoso; Mello	2013	Urânio	Passivo	Utilização de escória de siderurgia e calcário comercial como agentes neutralizantes	Bancada	Nacional	Brasil	Revista Brasileira de Ciência do Solo	Não	Não
A full-scale successive alkalinity-producing passive system (SAPPS) for the treatment of acid mine drainage	Lee <i>et al.</i>	2013	Carvão	Passivo	Sistema passivo sucessivo de produção de alcalinidade	Real	Internacional	South Korea	Water, Air, And Soil Pollution	Não	Não
Treatment of synthetic acid mine drainage using rice wine waste as a carbon source	Kim <i>et al.</i>	2013	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Uso de resíduo de vinho de arroz para redução de sulfato e metais dissolvidos (fonte de carbono para a atuação das SRB)	Bancada	Internacional	South Korea	Environmental Earth Sciences	Sim	Não
Removal of Metals and Acidity from Acid Mine Drainage Using Municipal Wastewater and Activated Sludge	Hughes; Gray	2013	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Cotratamento com águas residuárias municipais via processo de lodo ativado	Laboratório	Internacional	Ireland	Mine Water and the Environment	Sim	Não
Treatment of mining acidic leachates with indigenous limestone, Zimapan Mexico	Labastida <i>et al.</i>	2013	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Sistema de tratamento passivo utilizando calcário natural de rochas aflorantes da região de estudo	Laboratório	Internacional	Mexico	Journal of Hazardous Materials	Sim	Sim
The Potential Use of Phosphatic Limestone Wastes in the Passive Treatment of AMD: A Laboratory Study	Loqman; Hakkou; Benzaazoua	2013	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Resíduo de calcário fosfático	Laboratório	Internacional	Morocco	Mine Water and the Environment	Sim	Não
Natural Wetlands Are Efficient at Providing Long-Term Metal Remediation of Freshwater Systems Polluted by Acid Mine Drainage	Dean <i>et al.</i>	2013	Cobre	Passivo	Zona úmida natural (associação de plantas e bactérias acidófilas)	Real	Internacional	England	Environmental Science & Technology	Não	Não
Nanofiltration of Acid Mine Drainage in an Abandoned Mercury Mining Area	Sierra; Saiz; Gallego	2013	Mercúrio	Ativo	Nanofiltração	Bancada	Internacional	Spain	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Não
Remediation of acid mine drainage using metallurgical slags	Name; Sheridan	2014	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Uso de escória de aço inoxidável e oxigênio básico no tratamento de DAM	Laboratório	Internacional	South Africa	Minerals Engineering	Sim	Não
Long-term chemical and biological improvement in an acid mine drainage-impacted watershed	Underwood; Kruse; Bowman	2014	-	Passivo	Sete sistemas de tratamento já operantes (canal aberto de calcário, leito de escória de aço, leito de lixiviação de calcário, lagoa SAPS e outros)	Real	Internacional	United States	Environmental Monitoring and Assessment	Não	Não
Processamento de rejeito de carvão visando a redução de custos no tratamento da drenagem ácida de minas - estudo de caso na Região Carbonífera de Santa Catarina	Weiler; Filho; Schneider	2015	Carvão	Ativo	Neutralização/precipitação de metais pela adição de Ca(OH) ₂	Bancada	Nacional	Brasil	Revista Engenharia Sanitária e Ambiental	Não	Não
Acid mine drainage (AMD) treatment: Neutralization and toxic elements removal with unmodified and modified limestone Author links open overlay panel	Lakovleva <i>et al.</i>	2015	Cobre	Passivo	Calcário modificado e não modificado para a purificação de íons metálicos na neutralização da DAM e rmeoção de metais	Laboratório	Internacional	Finland	Ecological Engineering	Sim	Não
Water quality changes in acid mine drainage streams in Gangneung, Korea, 10 years after treatment with limestone	Shim	2015	Carvão	Passivo	Avaliação da eficácia da adição de calcário 10 anos depois	Real	Internacional	Korea	Journal of Geochemical Exploration	Não	Não
Gold acid mine drainage treatment by membrane separation processes: An evaluation of the main operational conditions	Aguiar <i>et al.</i>	2016	Ouro	Ativo	Membrana de nanofiltração e osmose reversa	Bancada	Nacional	Brasil	Separation and Purification Technology	Sim	Não
Effectiveness of various dispersed alkaline substrates for the pre-treatment of ferrous acid mine drainage	Rakotonimaro <i>et al.</i>	2016	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Uso de três substratos alcalinos dispersos diferentes (cinzas de madeira, calcita e dolomita) testados em reatores em batelada	Laboratório	Internacional	Canada	Applied Geochemistry	Sim	Sim
Integrated treatment of acid mine drainage using BOF slag, lime/soda ash and reverse osmosis (RO): Implication for the production of drinking water	Masindi; Osman; Mahfouz	2017	Carvão	Ativo	Sistema integrado de forno de oxigênio básico, escória, cal, carbonato de sódio e sistema de smose reversa	Semi-piloto	Internacional	South Africa	Desalination	Sim	Não
Year-Round Performance of a Passive Sulfate-Reducing Bioreactor that Uses Rice Bran as an Organic Carbon Source to Treat Acid Mine Drainage	Sato <i>et al.</i>	2017	-	Biológico	Sistema de tratamento passivo/biológico via biorreator redutor de sulfato usando farelo de arroz como acceptor de carbono para SRB	Laboratório	Internacional	Japan	Mine Water and the Environment	Sim	Não
Removal sulfate and metals Fe+2, Cu+2, and Zn+2 from acid mine drainage in an anaerobic sequential batch reactor	Costa; Rodriguez; Sancinetti	2017	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Uso de reator anaeróbico sequencial em batelada (ASBR) com SRB	Bancada	Nacional	Brasil	Journal of Environmental Chemical Engineering	Sim	Sim
Acid Rock Drainage Treatment Using Membrane Distillation: Impacts of Chemical-Free Pretreatment on Scale Formation, Pore Wetting, and Product Water Quality	Hull; Zodrow	2017	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Destilação por membrana hidrofóbica	Bancada	Internacional	United States	Environmental Science & Technology	Sim	Sim
Manganese and trace element removal from New Zealand coal mine drainage using limestone leaching beds	Christenson <i>et al.</i>	2017	Carvão	Passivo	Processos oxidativos abióticos versus bióticos na remoção de Mn(II) em leitos de lixiviação de calcário sob condições aeróbicas e circun-neutras	Laboratório	Internacional	New Zeland	New Zealand Journal of Geology and Geophysics	Sim	Sim
Acid rock drainage passive remediation: Potential use of alkaline clay, optimal mixing ratio and long-term impacts	Plaza <i>et al.</i>	2017	Carvão	Passivo	Argila alcalina (AC) como material de remediação para inibir a oxidação da pirita em pilhas de carvão residual	Laboratório	Internacional	United States	Science of the Total Environment	Não	Não
Assessing the sustainability of acid mine drainage (AMD) treatment in South Africa	Masindi <i>et al.</i>	2018	Carvão	Ativo	Neutralização/Adição de Calcário/Adição de Carbonato de sódio/Borbulhamento de CO ₂	Piloto	Internacional	South Africa	Science of the Total Environment	Sim	Sim
Acid mine drainage treatment by nanofiltration: A study of membrane fouling, chemical cleaning, and membrane ageing	Aguiar <i>et al.</i>	2018	Ouro	Ativo	Membrana de nanofiltração	Bancada	Nacional	Brasil	Separation and Purification Technology	Sim	Não
Removal of Acidity and Metals from Acid Mine Drainage-Impacted Water using Industrial Byproducts	RoyChowdhury; Sarkar; Datta	2018	Carvão	Passivo	Meio filtrante de fluxo de gravidade baseado em resíduo de tratamento de água potável para tratar DAM (remediação verde)	Laboratório	Internacional	United States	Environmental Management	Sim	Sim
Sulfate removal from acid mine water from the deepest active European mine by precipitation and various electrocoagulation configurations	Nariyan; Walkersdorfer; Sillanpää	2018	Cobre e Zinco	Ativo	Precipitação com cal integrada à eletrocoagulação para remoção de sulfato	Laboratório	Internacional	Finland	Journal of Environmental Management	Sim	Não
Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems	Torres <i>et al.</i>	2018	Sulfureto	Passivo	Sistema de dois tratamentos sucessivos com calcário e carbonato de bário	Bancada	Internacional	Spain	Journal of Cleaner Production	Sim	Sim
Microbial community analysis of sulfate-reducing passive bioreactor for treating acid mine drainage under failure conditions after long-term continuous operation	Aoyagi <i>et al.</i>	2018	-	Biológico	Biorreator de redução de sulfato contendo farelo de arroz	Laboratório	Internacional	Japan	Journal of Environmental Chemical Engineering	Sim	Não

Acid drainage neutralization and trace metals removal by a two-step system with carbonated rocks, Estado de Mexico, Mexico	Jallath <i>et al.</i>	2018	Minério de sulfeto maciço	Passivo	Tratamento em duas etapas, usando filito para remover Fe e Al e depois calcário para remover Cu, Cd, Mn e Zn	Laboratório	Internacional	Mexico	Environmental Earth Sciences	Sim	Sim
TRATAMENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS PARA A REMOÇÃO DO MANGANÊS E DE METAIS PESADOS ASSOCIADOS AOS EFLUENTES DA MINERAÇÃO DE CARVÃO POR MEIO DOS PROCESSOS DE FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO	Volpato <i>et al.</i>	2019	Carvão mineral	Ativo	Floculação e flotação por ar dissolvido	Bancada	Nacional	Brasil	Brazilian Journal of Environmental Sciences	Sim	Sim
Applications of Portland cement blended with fly ash and acid mine drainage treatment sludge to control acid mine drainage generation from waste rocks	Sephton; Webb; McKnight	2019	Enxofre (pirita e pirrotita)	Passivo	Mistura de cimento Portland com cinzas volantes e lodo neutralizado de DAM	Bancada	Internacional	Australia	Applied Geochemistry	Sim	Não
Acid mine drainage treatment by integrated submerged membrane distillation–sorption system	Ryu <i>et al.</i>	2019	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Membrana de contato direto submersa integrada	Laboratório	Internacional	Australia	Chemosphere	Sim	Não
Dynamics of Mn removal in an acid mine drainage treatment system over 13 years after installation	Crafton <i>et al.</i>	2019	Carvão	Passivo/Biológico	Processo em duas etapas: laboa anaeróbia e leito de calcário	Real	Internacional	United States	Environmental Earth Sciences	Não	Não
A field-pilot for passive bioremediation of As-rich acid mine drainage	Fernandez-Rojo <i>et al.</i>	2019	Efluente rico em Arsênio	Passivo	Utilização de um biorreator piloto explorando a oxidação do ferro por comunidades bacterianas autóctones	Piloto	Internacional	France	Journal of Environmental Management	Não	Não
Metals removal from acid mine drainage (Tinto River, SW Spain) by water gap and air gap membrane distillation	Amaya-Vias <i>et al.</i>	2019	-	Ativo	Uso de membranas de politetrafluoretileno para destilação e remoção de metais	Bancada	Internacional	Spain	Journal of Membrane Science	Sim	Não
Long-term performance of a UASB reactor treating acid mine drainage: effects of sulfate loading rate, hydraulic retention time, and COD/SO42- ratio	Cunha <i>et al.</i>	2019	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Reator anaeróbio de manta de lodo ascendente (UASB)	Bancada	Nacional	Brasil	Biodegradation	Sim	Sim
Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area	Qin <i>et al.</i>	2019	Ferro	Ativo	Estação de tratamento com etapas de neutralização de acidez, wetlands e floculação	Real	Internacional	China	Journal of Cleaner Production	Sim	Sim
Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (Chrysopogon zizanioides): A multiscale long-term study	Kiikskila <i>et al.</i>	2019	Carvão	Passivo	Sistema de tratamento flutuante usando capim vetiver	Bancada	Internacional	United States	Ecological Engineering	Sim	Sim
MONITORAMENTO E REMOÇÃO DE METAIS EM UM REATOR ANAERÓBIO APLICADO AO TRATAMENTO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA	Yabuki <i>et al.</i>	2020	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Reator de leito fixo-estruturado e fluxo descendente (DFSBR), com bactérias redutoras de sulfato (BRS)	Bancada	Nacional	Brasil	Brazilian Journal of Biosystems Engineering v. 14(4) 389-401, 2020	Sim (efluente sintético)	Sim
Optimization of a modular continuous flow bioreactor system for acid mine drainage treatment using Plackett–Burman design	Gu; Cui; Shang	2020	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo/Biológico	Biorreator de fluxo contínuo (4 módulos)	Piloto	Internacional	China	Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering	Sim (efluente sintético)	Sim
Removal of heavy metals using a novel sulfidogenic AMD treatment system with sulfur reduction: Configuration, performance, critical parameters and economic analysis	Sun <i>et al.</i>	2020	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Sistema de tratamento de AMD com um reator de redução de enxofre	Laboratório	Internacional	China	Environmental International	Sim	Não
Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India	Singh; Chakraborty	2020	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Zona úmida construída com fluxo subterrâneo horizontal	Laboratório	Internacional	India	Journal of Hazardous Materials	Sim	Não
Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO3-rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO3)	Larraguibel <i>et al.</i>	2020	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Substrato alcalino disperso (BaCO3) na remoção de sulfato	Laboratório	Internacional	Chile	Journal of Cleaner Production	Não	Não
Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material	García-Valero <i>et al.</i>	2020	Chumbo e Zinco	Passivo	Teste de materiais alcalinos para neutralização de AMD e precipitação de metais	Laboratório	Internacional	Spain	Journal of Water Process Engineering	Sim	Não
Sulfate removal from mine drainage by electrocoagulation as a stand-alone treatment or polishing step	Foughaili <i>et al.</i>	2020	Ouro	Ativo	Eletrocoagulação (EC) como um tratamento autônomo ou como uma etapa de polimento após a precipitação química na remoção do sulfato	Laboratório	Internacional	Canada	Minerals Engineering	Sim	Não
Estudo do potencial de adsorção de íons de ferro de água contaminada com drenagem ácida de mina utilizando geopolímero à base de cinza da casca de arroz e resíduo cerâmico	Wesler <i>et al.</i>	2021	Carvão	Ativo	Adsorção por geopolímero à base de cinza de casca de arroz e resíduo cerâmico	Bancada	Nacional	Brasil	Eng. Sanitária e Ambiental	Sim	Não
Simulated acid mine drainage treatment in iron oxidizing ceramic membrane bioreactor with subsequent co-precipitation of iron and arsenic	Demir <i>et al.</i>	2021	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Biorreator de membrana cerâmica oxidante de ferro (CMBR)	Laboratório	Internacional	Turkey	Water Research	Sim	Não
Acid mine drainage treatment and sequential metal recovery by means of bioelectrochemical technology	Leon-Fernandez <i>et al.</i>	2021	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Sistema bioeletroquímico (BES)	Laboratório	Internacional	Spain	Journal of Chemical Technology and Biotechnology	Sim	Não
Passive treatment test of acid mine drainage from an abandoned coal mine in Kaili Guizhou, China	Wenbo <i>et al.</i>	2021	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Substrato alcalino disperso em escala de laboratório	Laboratório	Internacional	China	Water Science & Technology	Sim	Não
The Treatment of Acid Mine Drainage Using Vertically Flowing Wetland: Insights into the Fate of Chemical Species	Nguegand <i>et al.</i>	2021	Ouro	Passivo	Zonas úmidas de fluxo vertical enriquecida com Vetiveria zizanioides como meio descontaminante e solo como substrato	Piloto	Internacional	South Africa	Minerals	Não	Não
Laboratory-Scale Bio-Treatment of Real Arsenic-Rich Acid Mine Drainage	Battaglia-Brunet <i>et al.</i>	2021	-	Biológico	Biorreator anaeróbio de redução de sulfato alimentado continuamente com a etapa de oxidação de ferro a jusante	Laboratório	Internacional	France	Water, Air, And Soil Pollution	Sim	Não
Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings	Rey <i>et al.</i>	2021	Ouro	Passivo	Tratamento com tufo natural rico em zeólita e areia silicosa com diferentes proporções de peso	Laboratório	Internacional	Colombia	Journal of Geochemical Exploration	Sim	Sim
Long-term operation of a permeable reactive barrier with diffusive exchange	Schwarz; Pérez	2021	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Reator de bancada que simula uma barreira reativa permeável com troca sulfídica difusiva (SDES PRB)	Bancada	Internacional	Chile	Journal of Environmental Management	Não	Não
Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration	Orden <i>et al.</i>	2021	Pirita	Passivo	Estação de tratamento passiva de Substrato Alcalino Disperso (DAS) em escala real	Real	Internacional	Spain	Journal of Environmental Management	Sim	Sim
Remediation of Metal Contaminated Simulated Acid Mine Drainage Using a Lab-Scale Spent Mushroom Substrate Wetland	Jordan; Redington; Holland	2021	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Zona úmida de substrato de cogumelo usado em escala piloto para a atenuação da drenagem ácida simulada de mina	Piloto	Internacional	Ireland	Water, Air, And Soil Pollution	Não	Não
Enhanced Microbial Oxidation–Neutralization Treatment of Acid Mine Drainage Rich in Ferrous Ions (Fe ²⁺)	He <i>et al.</i>	2022	Efluente sintético gerado em laboratório	Biológico	Neutralização de oxidação microbiana	Bancada	Internacional	China	Environmental Research and Public Health	Sim	Sim
Passive co-treatment of phosphorus-depleted municipal wastewater with acid mine drainage: Towards sustainable wastewater management systems	Masindi; Shabalala; Foteinis	2022	Carvão	Passivo	Cotratamento com águas residuárias municipais	Bancada	Internacional	South Africa	Journal of Environmental Management	Sim	Sim
Passive treatment of acid mine drainage from the Sidi-Kamber mine wastes (Mediterranean coastline, Algeria) using neighbouring phosphate material from the Djebel Onk mine	Merchichi <i>et al.</i>	2022	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Tratamento passivo da DAM utilizando materiais fosfáticos argelinos em um dreno óxico	Laboratório	Internacional	Algeria	Science of the Total Environment	Sim	Não
Performance of Semi-passive Systems for the Biological Treatment of High-As Acid Mine Drainage: Results from a Year of Monitoring at the Carnoulès Mine (Southern France)	Vanegas <i>et al.</i>	2022	-	Semipassivo	Oxidação biológica de Fe e As por bactérias indígenas e posterior imobilização de As por hidrossulfatos férricos	Real	Internacional	France	Mine Water and the Environment	Não	Não
Long-term treatment of acid mine drainage by alkali diffusion ceramic reactor: Simultaneous metal removal mechanisms	Lee <i>et al.</i>	2022	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Reator de difusão alcalina usando meios porosos cerâmicos (ceram-ADR)	Laboratório	Internacional	Republic of Korea	Chemosphere	Não	Não
Experimental Study on the Hydroponics of Wetland Plants for the Treatment of Acid Mine Drainage	Wu <i>et al.</i>	2022	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo	Teste de diferentes plantas para comporem uma wetland aplicada como etapa de pós-tratamento de uma barreira reativa permeável	Piloto	Internacional	China	Sustainability	Sim	Não

Alternative Low-Cost Treatment for Real Acid Mine Drainage: Performance, Bioaccumulation, Translocation, Economic, Post-Harvest, and Bibliometric Analyses	Wibowo <i>et al.</i>	2022	Carvão	Passivo	E. crassipes e P. stratiotes como fitotecnologia para remover poluentes da DAM (wetland)	Laboratório	Internacional	Indonesia	Sustainability	Sim	Não
Continuous and effective treatment of heavy metal in acid mine drainage based on reducing barrier system: A case study in North China	Hu <i>et al.</i>	2022	Cobre	Biológico	Sistema de barreira redutora construído com resíduos industriais comuns de lodo ativado e cinzas volantes como meio de reação	Laboratório	Internacional	China	Journal of Hazardous Materials Advances	Sim	Não
Development of Artificial Geochemical Filter to Treat Acid Mine Drainage for Safe Disposal of Mine Water in Salt Range Portion of Indus Basin—A Lab to Pilot Scale Study	Khan <i>et al.</i>	2022	Carvão	Passivo	Dois filtros diferentes foram projetados usando calcário Wurga	Laboratório e Piloto	Internacional	Pakistan	Sustainability	Sim	Não
A novel approach for treating acid mine drainage by forming schwertmannite driven by a combination of biooxidation and electroreduction before lime neutralization	Song <i>et al.</i>	2022	Depósito Polimetálico	Biológico	Processo cíclico de biooxidação e eletrorredução antes da neutralização com cal	Piloto	Internacional	China	Water Research	Sim	Não
Effective and simultaneous removal of heavy metals and neutralization of acid mine drainage using an attapulgite-soda residue based adsorbent	Chen <i>et al.</i>	2022	Efluente sintético gerado em laboratório	Ativo	Uso de partículas compostas de atapulgita natural (AT) e resíduo de soda (SR) (AT-SR)	Laboratório	Internacional	China	Science of the Total Environment	Sim	Sim
Treating acid mine drainage with decomposed organic soil: Implications for peatland rewetting	Roesel; Zak	2022	Linhito	Passivo	Uso de solo de turfa altamente decomposta	Laboratório	Internacional	Germany	Journal of Environmental Management	Sim	Não
Use of propionic acid additions to enhance zinc removal from mine drainage in short residence time, flow-through sulfate-reducing bioreactors	Gandy <i>et al.</i>	2023	Efluente sintético gerado em laboratório	Passivo/Biológico	Biorreatores (SRB)	Bancada	Internacional	England	Journal of Environmental Management	Não	Não
Effective treatment of real acid mine drainage using MgO-metakaolinite nanocomposite	Mothetha <i>et al.</i>	2023	Carvão	Ativo	Nanocompósito de metacaulinita rico em Ca e MgO sintetizado mecanicamente	Laboratório	Internacional	South Africa	Journal of Water Process Engineering	Sim	Sim
Laboratory simulation of the swampy forest system for the passive treatment of acid mine drainage in coal mine reclamation areas	Noor <i>et al.</i>	2023	Carvão	Passivo	Sistema de floresta pantanosa	Laboratório	Internacional	Indonesia	Nature	Sim	Sim
Removal of Ag, Au, and As from Acid Mine Water Using Lemna gibba and Lemna minor—A Performance Analysis	Kislioglu	2023	Cobre	Passivo	Investigação dos desempenhos de acumulação de Ag, Au e As usando L. gibba e L. minor crescendo nas águas ácidas da mina do depósito de cobre Maden em condições de baixo pH	Laboratório	Internacional	Turkey	Water	Sim	Não