

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

RÉGIS LINHARES PAULO

**Métodos de Predição da Drenagem Ácida de Mina (DAM) Empregados no Brasil e no
Mundo: Revisão Sistemática**

São Paulo

2024

**Métodos de Predição da Drenagem Ácida de Mina (DAM) Empregados no Brasil e no
Mundo: Revisão Sistemática**

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Profa. Dra. Valéria Guimarães
Silvestre Rodrigues

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação

(aguardar instruções)

AGRADECIMENTOS

Sou grato por mais esta oportunidade de aprendizado e conclusão de etapa em minha carreira acadêmica. Tal feito foi possível pela imensurável empatia das orientadoras Profª. Drª Lélia Cristina da Rocha Soares e Profª. Drª Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, que me propiciaram total apoio, compreensão e incentivo na elaboração deste trabalho durante uma fase bastante delicada em minha vida pessoal.

Trago à tona também meus pais, que sempre me apoiaram em todo meu desenvolvimento como cidadão e como pessoa, acreditando em meu potencial e me auxiliando com palavras de apoio, pensamentos positivos para que pudesse ter resiliência em minhas atividades.

Agradeço ao Kainã, Mariza e Patrícia, por sempre estarem ao meu lado, em especial nos momentos mais desafiadores, foram de inenarrável comprometimento e dedicação em tudo que precisei durante este processo.

A USP e toda sua comunidade, pela possibilidade da realização deste curso de forma remota, abrangendo os colegas e profissionais de diferentes localidades e enriquecendo mais nossa bagagem acadêmica.

Aos colegas da turma, que mesmo na modalidade online, foi possível e enriquecedora a experiência, a troca de conhecimentos correlatos ao curso e a convivência amistosa.

A Cristina, amiga e colega de trabalho, que me propiciou minha primeira experiência profissional em gestão de áreas contaminadas.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

Linhares Paulo, Régis. Métodos de Predição da Drenagem Ácida de Mina (DAM) Empregados no Brasil e no Mundo: Revisão Sistemática. 2024. 61 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Os sítios designados para atividades de mineração, por si só, já atestam complexidade por suas grandes dimensões e potenciais desequilíbrios ecológicos, na qual a ação antrópica provoca não só os ambientes naturalmente estáveis como desafia a tecnologia a reinventar-se em busca de soluções a fim de minimizar danos e promover remediação da área explorada. Neste contexto, torna-se necessário garantir a proteção da comunidade e do meio ambiente como um todo, dos efeitos danosos destes locais sob influência desta atividade econômica conhecida por seu potencial altamente deploratório, tais como: geração volumosa de resíduos devido à disposição das pilhas de escórias, estéreis e rejeitos, lançamentos de efluentes e diversas outras alterações no meio ambiente. Dentre os danos ambientais, destaca-se a drenagem ácida de mina (DAM) – processo de oxidação de sulfetos que quando expostos à ação da água e do oxigênio, pode acidificar os corpos hídricos e lixivar metais potencialmente tóxicos, contaminando diferentes sistemas ambientais, sendo necessário, portanto sua predição. Daí a importância de uma minuciosa caracterização da área degradada, contemplando o meio físico, balanço hídrico, aspectos geomorfológicos, geotécnicos, hidrológicos, mineralógicos e químicos, para uma melhor solução de engenharia para evitar, controlar ou neutralizar sua ocorrência. Neste sentido, o presente estudo realizou uma revisão sistemática de trabalhos acadêmicos e das diversas práticas recomendadas por organizações nacionais e internacionais representativas de empresas e instituições que atuam no setor de mineração, usados na predição e minimização da DAM. Observou-se uma unanimidade para as estratégias de gestão que estabeleça uma melhor caracterização com testes mais atualizados e abrangentes, pois os que são praticados atualmente têm suas limitações e podem prejudicar os objetivos quanto a predição e tratamento adequado nas diferentes fases de desenvolvimento de uma mina, sendo crucial a realização de diversos ensaios de caracterização mineralógica, dos efluentes e resíduos não só provenientes da atividade minerária com a área em torno dela, garantindo melhor eficiência das técnicas aplicadas. Esta é a melhor solução que pode ser aplicada para prevenção da ocorrência de drenagem ácida de mina devido a questões econômicas principalmente garantindo minimizar os impactos ambientais e a viabilidade do projeto da mina. São citados ensaios preditivos, dentre eles os já conhecidos estáticos e cinéticos, complementares, assim como os tipos de coberturas. Como resultado observou-se que quanto mais precoce for a realização destes testes, maior garantia e eficiência na gestão em toda vida útil da mina e mesmo após seu descomissionamento, é possível controlar e tratar estes impactos ao meio ambiente e obter ganhos financeiros evitando-se dispêndios com remediação da área.

Palavras-chave: Drenagem Ácida de Mina. Predição. Métodos de Predição. Ensaios Estáticos e Cinéticos. Coberturas Secas.

ABSTRACT

Linhares Paulo, Regis. Acid Mine Drainage Prediction Methods used in Brazil and the World: Systematic Review. 2024. 61 f. Monography (MBA in Contaminated Area Management, Sustainable Urban Development and Brownfields Revitalization) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The sites designated for mining activities, in themselves, already attest to complexity due to their large dimensions and potential ecological imbalances, in which human action not only provokes naturally caused environments but also challenges technology to reinvent itself in search of solutions. In this context, it is necessary to guarantee the protection of the community and the environment as a whole, from the harmful effects of these places under the influence of this economic activity known for its highly deplorable potential, such as: voluminous generation of waste due to the disposal of piles of slag, waste and tailings, effluent releases and several other changes to the environment. Among the environmental damages, acid mine drainage (AMD) stands out – a process of sulfide oxidation that, when exposed to the action of water and oxygen, can acidify water bodies and leach potentially toxic metals, contaminating different environmental systems, being necessary, therefore its prediction. Hence the importance of a thorough characterization of the degraded area, including the physical environment, water balance, geomorphological, geotechnical, hydrological, mineralogical and chemical aspects, for a better engineering solution to avoid, control or neutralize its occurrence. In this sense, the present study carried out a systematic review of academic works and the various practices recommended by national and international organizations representing companies and institutions operating in the mining sector, used in predicting and minimizing DAM. There was unanimity for management strategies that establish a better characterization with more up-to-date and comprehensive tests, as those currently practiced have their limitations and can harm the objectives regarding prediction and adequate treatment in the different phases of a mine's development. , it is crucial to carry out several mineralogical characterization tests, of effluents and residues not only from the mining activity with the area around it, ensuring better efficiency of the techniques applied. This is the best solution that can be applied to prevent the occurrence of acid mine drainage due to economic issues mainly ensuring minimizing environmental impacts and the viability of the mine project. Predictive tests are mentioned, including the already known static and kinetic tests, which are complementary, as well as the types of coverage. As a result, it was observed that the earlier these tests are carried out, the greater guarantee and efficiency in management throughout the useful life of the mine and even after its decommissioning, it is possible to control and treat these impacts on the environment and obtain financial gains by avoiding expenditure on remediation of the area.

Keywords: Acid Mine Drainage. Prediction. Prediction Methods. Static and Kinetic Tests. Dry Covers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de drenagem por oxidação de sulfetos	19
Figura 2 – Área contaminada por DAM em Itaguaí - RJ	21
Figura 3 – Tipos de testes realizados na predição da DAM	22
Figura 4 – Recursos Minerais do Brasil	24
Figura 5 – Usina Hidrelétrica Irapé	25
Figura 6 – Exemplo de cobertura seca em área com DAM.....	35
Figura 7 – Rio Animas, Colorado, USA.....	40
Figura 8 – Exemplo de microencapsulamento de resíduo gerador de DAM	41
Figura 9 – Divergências entre metodologias para identificação dos minerais	45
Figura 10 - Ensaio de coluna padrão (ASTM D5744-96)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de amostras recomendadas, em cada fase da atividade de mineração, visando a caracterização da geração de DAM.....	22
Tabela 2 – Características principais dos sulfetos	23
Tabela 3 - Métodos utilizados na predição da DAM.....	26
Tabela 4 – Indicadores de Qualidade de Água com DAM.....	28
Tabela 5 – Tipos de ensaios estáticos para predição da DAM	29
Tabela 6 – Classificação coberturas secas para efeito de inibição de DAM	34
Tabela 7- Literaturas relacionadas aos Métodos de Predição.....	37
Tabela 8 – Principais Metais Potencialmente Tóxicos Associados com a DAM e seus Efeitos nas Plantas	42
Tabela 9 – Medidas de Prevenção da origem na DAM abordadas nas Literaturas	42
Tabela 10 - Cinética química provocada por ação bacteriana	47
Tabela 11 - Técnicas recentes para suprimir a formação de DAM	49
Tabela 12- Estratégias recentes para reciclar resíduos de minas.....	53

LISTA DE SIGLAS

ABA – Acid Base Accounting

ANC – Acid Neutralizing Capacity

AP – Acid Generation Potential

BABM – Balanço Ácido Base Modificado

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CME – Microencapsulação Transportadora

DAM – Drenagem Ácida de Mina

DNM – Drenagem Neutra de Mina

DRX – Difração de Raios X

DS – Drenagem Salina

DTC TETA – Trietilenotetramina-Bisditiocarbamato

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

EDTA – Ácido Etlenodiamino Tetra-Acético

FRX – Fluorescência de raios X

GARD – Global Acid Rock Drainage Guide

MKFER – Resina de Metiletilcetona Formaldeído

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NAG – Net Acid Generation

NP – Neutralization Potential

pH – Potencial Hidrogeniônico

PMB – Painel Mineração Brasil

TDS – Total de Sólidos Dissolvidos

UHE – Usina Hidrelétrica

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency

USGS – US Geological Survey

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivos Específicos	15
3.	JUSTIFICATIVA.....	16
4.	FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	Drenagem Ácida de Mina	17
4.2	Previsão da DAM.....	21
4.3	Métodos Analíticos	26
4.3.1	Análise Granulométrica.....	26
4.3.2	Análise Mineralógica.....	27
4.3.3	Análise Química	27
4.3.4	Indicadores específicos da qualidade da água relacionada a DAM.....	27
4.4	Ensaios Estáticos.....	28
4.5	Ensaios Cinéticos	32
4.5.1	Ensaios em células úmidas	33
4.5.2	Free Leach	33
4.5.3	Ensaios de lisímetros.....	33
4.6	Sistemas de Coberturas	33
5	MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1	Ferramentas de busca.....	37
5.1.1	Dedalus.....	37
5.1.2	Google Acadêmico	37
5.1.3	Scopus	37
6	RESULTADOS.....	38
6.1	Formação, controle e tratamento de drenagem ácida de minas: abordagens e estratégias – Estados Unidos, 2019	39
6.2	Desafios e caminhos para tratamento, beneficiamento e valorização da drenagem ácida de minas na economia circular: uma revisão – África do Sul, 2022.....	40
6.3	Drenagem Ácida de Minas: Desafios e Oportunidades – África do Sul, 2014.....	41
6.4	Indicadores Ambientais para Drenagem Ácida de Mina: Avanços no Conhecimento e Desafios Futuros – Austrália, 2012	43
6.5	Previsão de Drenagem Ácida de Rocha: Uma Revisão Crítica – Suécia, 2016	44

6.6	Interconectividade de Aquíferos e os Efeitos da Drenagem Ácida de Mina na Qualidade das Águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina – Brasil, 2018	46
6.7	Ensaios Laboratoriais para Avaliação da Drenagem Ácida da Barragem da UHE Irape – Brasil, 2011	46
6.8	Uma Revisão das Estratégias Recentes para Prevenção da Drenagem Ácida de Mina e Reciclagem de Rejeitos de Mina – Japão, 2019	48
6.9	Progresso Recente nas Tendências Tecnológicas de Drenagem Ácida de Mina na África do Sul: Prevenção, Tratamento e Recuperação de Recursos – África do Sul, 2023	55
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração, apesar de não ser considerada uma atividade essencial, é base para cadeia produtiva de uma gama de setores econômicos, tem sua atuação de forma cíclica e no Brasil ela respondeu por 40% do saldo comercial da balança em 2022, segundo o Panorama Mineração Brasil (PMB, 2023). Sua presença na sociedade vem desde a utilização de minérios/minerais/rochas para fabricação de utensílios como a pedra lascada até o uso industrial de componentes para fabricação dos atuais bens de consumo, a exemplo os smartphones – tão presentes no dia a dia, há destaque para diversas finalidades de uso em tão diferentes segmentos industriais, tais como construção civil, transportes, saúde, dentre outras.

A magnitude de suas atividades desperta críticas, devido aos impactos ambientais e sociais causados, em especial da comunidade diretamente afetada, também chama a atenção do poder econômico e público, e evidencia o quanto é essencial equalização de boas práticas em todo processo operacional a fim de mitigar maiores danos. Um destes impactos é o fenômeno da Drenagem Ácida de Mina (DAM), que pode ocorrer devido à exposição dos sulfetos aos agentes intempéricos e atividades microbianas, causando sua oxidação e a liberação e lixiviação de metais dissolvidos e ácido sulfúrico, acidificando os corpos hídricos, durante e após os processos inerentes à mineração.

O Brasil, pela sua extensão territorial, tem seu protagonismo global com diversos bens minerais, foram 9530 minas elencando o país, como segundo maior produtor de minério de Ferro – o que equivale a mais de 60% da participação de faturamento do setor (PMB, 2023). Além do mais o país desonta entre os maiores países com atividades de mineração no mundo.

Consequentemente há casos de geração de DAM com estas atividades de mineração. Segundo Borma e Soares (2002), a DAM ocorre quando o mineral ou metal de interesse encontra-se associado a sulfetos; sua ocorrência tem sido relatada na extração de ouro, carvão, cobre, zinco, urânio, entre outros. Alguns dos exemplos de onde ocorreu este tipo de degradação no Brasil são: a mina de Urânio em Poços de Caldas-MG (extração de urânio) e Bacia Carbonífera do Sul de Santa Catarina (extração de carvão). No The Global Acid Rock Drainage (GARD Guide, 2009) são destacados outros casos pelo mundo de geração da DAM como o do Rio Tinto e Rio Agrio (Rio Azedo) – Espanha; Copper Creek, Sulphur Creek - USA; Rötbach (red Brook) – Alemanha, dentre outras.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidas soluções para recuperar áreas que foram degradadas pela DAM e os processos de remediação e tratamentos ocorrem de forma

integrada, pois cada mina tem sua particularidade, mas podem ser feitos de forma ativa ou passiva, o que inclui, como exemplo: a implantação de coberturas secas e úmidas, sistemas de drenagem, tratamento dos efluentes, neutralização química com agentes alcalinos, adsorção, retirada de oxigênio, sulfetos ou água, entre outros.

Com o passar dos anos, busca-se minimizar a geração da DAM, evitando-se assim a degradação e recuperação destas áreas. Neste contexto, a predição é uma ferramenta importante e econômica, pois danos ambientais podem ser significativamente reduzidos e tratados em fase inicial de processo, para a identificação prematura de compostos que sejam potencialmente geradores de DAM. Muito embora para sua determinação não exista ainda um ensaio específico utiliza-se como base e de forma complementar, uma gama de testes recomendados pela literatura, que conjugados permitem a execução de diversos ensaios químicos e geoquímicos, tais como: ensaios preliminares; análises químicas e mineralógicas; métodos BABM (Balanço Ácido Base Modificado); métodos da Relação Potencial de Produção Alcalina (PPA/S Total), entre outros (GARD Guide, 2009).

Neste contexto o objetivo deste estudo foi à realização de uma revisão sistemática sobre as formas de prevenção/predição da DAM que estão sendo realizadas no Brasil e no mundo.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa foi um levantamento detalhado dos métodos de prevenção e predição da DAM que estão sendo usados em escala nacional e mundial, por meio de revisão sistemática.

2.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender quão fundamentais são as caracterizações físico-químicas e mineralógicas na evolução de estudos correlatos, para obter sucesso na prevenção da DAM, antes mesmo de seu processamento mineral e contribuir com este tema na elucidação das principais práticas desenvolvidas em escala global e críticas as limitações de alguns métodos;
- Avaliar a evolução destes métodos de predição (compilando diversos ensaios, inclusive os ensaios estáticos e cinéticos).

3. JUSTIFICATIVA

A amplitude das atividades alcançadas pelo setor de mineração atesta sua importância na cadeia produtiva global, mediante a isto defrontam-se grandes desafios socioambientais, nos quais é preciso estar em constante processo de transformação, provendo maior eficiência nos processos com a agenda *Environmental Social and Governance* (ESG), que veio para somar esforços em busca destes aperfeiçoamentos. Os insumos são fundamentais para economia, alimentam diversas indústrias e contribuem para o crescimento de uma nação, provendo avanços tecnológicos, combustíveis fósseis, metais preciosos, produção de energia, dentre outros.

Sobre o meio ambiente, seus efeitos podem abranger as águas subterrâneas, ar, solo e os corpos d'água superficiais. Consequentemente há a geração de um grande volume de resíduos provenientes destes processos, que por si só já são desafiadores, e por mais, há a preocupação do seu potencial na geração da DAM. Os lixiviados ácidos contaminados, por exemplo, não se limitam apenas aos rejeitos, mas também são gerados em rochas residuais e detritos escavados contendo minerais sulfetados (Ilhwan et al., 2019). Os altos custos e a complexidade na remediação destes tipos de impactos, corroboram no empenho para sua caracterização, bem como, da área onde os resíduos de mineração serão dispostos. A prevenção da DAM deve começar na exploração e continuar durante todo o ciclo de vida da mina, sendo este planejamento fundamental para o sucesso da prevenção, como já apontado pelo GARD (GARD Guide, 2009) e USEPA (USEPA, 1994).

A caracterização do meio físico é importante na fase de prospecção da mina, para que durante sua operação já possam ser tomadas providências de minimização da DAM, caso elas possam ocorrer. Neste contexto é importante avaliar o avanço nestes estudos de prevenção para controle e mitigação de impactos no meio, a fim de proporcionar o mínimo de dano e uma melhor qualidade ambiental das atividades de mineração.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

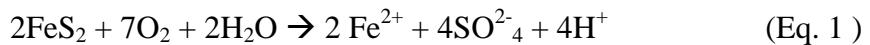
Será abordado neste capítulo a base teórica sobre o tema, a qual engloba sua definição, previsão e os métodos utilizados em sua caracterização.

4.1 Drenagem Ácida de Mina

Trata-se de um fenômeno cuja formação se dá pela oxidação natural de minerais sulfetados quando expostos ao oxigênio e a água, podendo ocorrer em minas de sulfetos metálicos e também em minas de carvão, urânio, entre outras. Na maioria das vezes, ocorre em minas em operação e abandonadas, principalmente nas pilhas de estéril e nos rejeitos (resíduos de mineração) (GARD Guide, 2009). A disposição adequada dos resíduos destas operações, evitando-se que sejam expostos as condições oxidantes em presença de água, é fundamental para a prevenção e minimização da DAM (Miller, 1992; Souza, 1995; Soares et al., 2000).

Entretanto, este fenômeno não está restrito apenas a atividade de mineração, podendo também ocorrer na construção de aeroportos, barragens, rodovias, túneis, poços abertos e outras escavações profundas onde os minerais de sulfetados são expostos (GARD Guide, 2009). No caso do presente estudo, o foco principal está relacionado com a atividade de mineração.

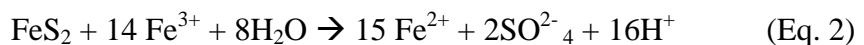
Embora existam outros sulfetos geradores de DAM, a pirita, por ser um mineral abundante em relação aos outros sulfetos, é o mais referenciado e é utilizado nas equações que demonstram a formação da DAM. Assim, a Equação 1, segundo Melo et al. (2014), exemplifica de forma sucinta como ocorre a geração da DAM por meio da oxidação direta da pirita (FeS_2).



A oxidação da pirita é um processo que ocorre em vários estágios, alguns dos quais simultâneos, em função do tempo de exposição ao oxigênio atmosférico, dos processos microbiológicos e das condições predominantes no interior da pilha ou depósito de resíduos (Borma e Soares, 2002).

Assim, a drenagem ácida de mina pode ocorrer também de forma indireta, por meio da oxidação química da pirita (FeS_2) pelo íon férrico (Fe^{3+}), gerando mais acidez (Melo et al., 2014) (Equação 2). Essa reação é rápida desde que exista Fe^{3+} em concentração suficiente para que ela ocorra (Borma e Soares, 2002). A medida em que o Fe^{3+} presente é consumido, a

velocidade de oxidação decresce e passa a ser dependente da velocidade de produção desse íon.



Há também, reações de oxidações indiretas que ocorrem pela ação de bactérias, segundo Melo et al. (2014), especificamente a *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Equação 3).



A cinética dos processos geoquímicos envolvidos na geração da drenagem ácida de mina pode ser afetada por fatores tais como concentração de oxigênio na superfície da partícula de sulfeto, granulometria das partículas, superfície específica do mineral sujeito à oxidação, presença de bactérias, temperatura, concentração do íon férrico, pH do meio, entre outros (Borma e Soares, 2002). Ainda segundo estes autores, há ainda três condições que podem ocorrer simultaneamente para sua geração:

- Resíduo contendo sulfetos em quantidade suficiente para reagir química e biologicamente, gerando ácido em volume e velocidade maior que aquela pela qual pode ser neutralizado por alcalis presentes no meio;
- Os resíduos devem apresentar propriedades físicas tais que permitam a infiltração de água e oxigênio em quantidade suficiente para promover a ocorrência de reações químicas e biológicas;
- O clima deve ser úmido o bastante para que a água da chuva se infiltre e percole através do resíduo.

Nem todos os minerais sulfetados ou rochas que possuem sulfeto serão geradores de ácido. A probabilidade de uma amostra de minério específico gerar acidez está diretamente relacionada com a proporção entre os minerais sulfetados potencialmente produtores de ácido e os minerais alcalinos potencialmente consumidores de ácido, e como este mineral se encontra na rocha (se incluso ou livre) (MEND, 2009).

Nos últimos anos, desde que as consequências ambientais relacionados à DAM se tornaram mais visíveis, valendo destacar o artigo “*Industrial wastes. Acid mine drainage (Hoffert, 1947)*”, muitas pesquisas foram desenvolvidas para aprimorar as técnicas de controle, mitigação e remediação. Devendo-se atentar a peculiaridade de cada uma das

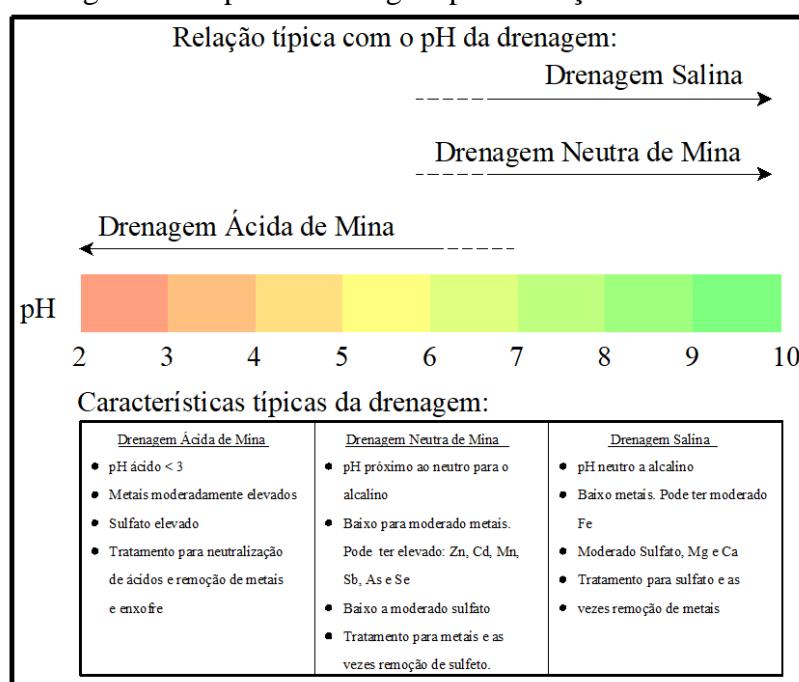
ocorrências para aplicar as técnicas mais adequadas para minimizar seus impactos ambientais negativos, especialmente para seus receptores, que podem ser o próprio entorno da mina, bem como a população diretamente afetada pela atividade.

Diversas entidades em diferentes países têm se unido na transferência de conhecimentos a fim de auxiliar na mitigação dos efeitos danosos da DAM. Assim, foram elaborados documentos com protocolos para diferentes abordagens visando compilar os dados sobre DAM e padronizar as formas de detecção, sendo o Guia Global de Drenagem de Rochas Ácidas (GARD Guide, 2009), um dos mais importantes e mais utilizados.

Segundo o guia, todos os três tipos de drenagem (drenagem salina, neutra e ácida) podem ser produzidas pela oxidação de sulfetos, conforme Figura 1 - embora faltem diretrizes formais para definições quantitativas de Drenagem Ácida (DAM), Drenagem Neutra de Mina (DNM) e Drenagem Salina (DS). Assim, foram aplicados os seguintes limiares aproximados entre os três tipos de drenagem de minas:

- Acima de pH 6: DNM e SD; e abaixo de pH 6: DAM
- Concentração de sulfato de 1.000 miligramas por litro (mg/L): limite entre DNM versus. DS entre água doce e água levemente salina de 1.000 mg/L TDS (Total de Sólidos Dissolvidos) (USGS, 2004).
- Uma característica fundamental da maioria dessas águas é que elas contêm metais potencialmente tóxicos que foram lixiviados dos sólidos circundantes.

Figura 1 – Tipos de drenagem por oxidação de sulfetos



Fonte: (GARD Guide, 2009)

Caso alcance os corpos hídricos próximos, a DAM, pode contaminá-los tornando-os impróprios para o uso, mesmo após cessadas as atividades de mineração, pois trata-se de uma solução rica em metais dissolvidos e ácido sulfúrico, que foram lixiviados dos resíduos, principalmente em decorrência do pH ácido (GARD Guide, 2009).

Outro exemplo de consequência do fenômeno da ocorrência da DAM se reflete no solo, que impactado pelo percolado provoca sua contaminação bem como em outros corpos hídricos superficiais ou freáticos. Os metais do percolado (zinc (Zn), chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr) e alumínio (Al)) podem afetar o comportamento biológico do ambiente, comprometendo a reprodução e/ou a sobrevivência dos organismos (Simate and Ndlovu, 2014).

As Figuras 2 e 3 mostram diferentes locais no Brasil, cujas drenagens estão ácidas devido à oxidação dos sulfetos.

Figura 2 – Ocorrência de DAM em contato com corpo hídrico do rio Pio, em SC



Fonte: Acervo Núcleo de Apoio Técnico de Criciúma (NUMA) / SUREG-PA.

Figura 2 – Área contaminada por DAM em Itaguaí - RJ



Fonte: Ensp/FioCruz

4.2 Previsão da DAM

Prever o potencial de geração ácida e da lixiviação de metais potencialmente tóxicos são primordiais para o planejamento de um empreendimento de mineração com a diminuição de ônus ao meio ambiente, possibilitando medidas de controle e assim eliminando custos e medidas corretivas. Dentre os métodos utilizados para prever o potencial de geração de DAM tem-se os estáticos e cinéticos (EPA, 1994).

Os ensaios estáticos são testes que determinam o potencial de geração de acidez e o potencial de neutralidade de acidez de uma amostra. Esta análise permite prever a geração de DAM. São testes fáceis, rápidos e mais econômicos se comparados aos testes cinéticos (Biella et al., 2022).

Já os ensaios cinéticos diferem dos ensaios estáticos na tentativa de simular as reações de oxidação natural que ocorre na área degradada, geralmente num ritmo acelerado. Com os ensaios cinéticos é possível obter o potencial de geração de acidez, facilitando a tomada de decisões (GARD Guide, 2009).

A seleção dos pontos de amostragens e a quantidade adequada de amostras são de bastante complexidade e devem ser considerados com muito critério em cada uma das fases de um projeto, pois deve-se representar a variabilidade de cada material geológico que será minerado ou exposto e cada tipo de resíduo. Recomenda-se uma abordagem faseada a implementação de métodos preditivos (GARD Guide, 2009), conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Número de amostras recomendadas, em cada fase da atividade de mineração, visando a caracterização da geração de DAM

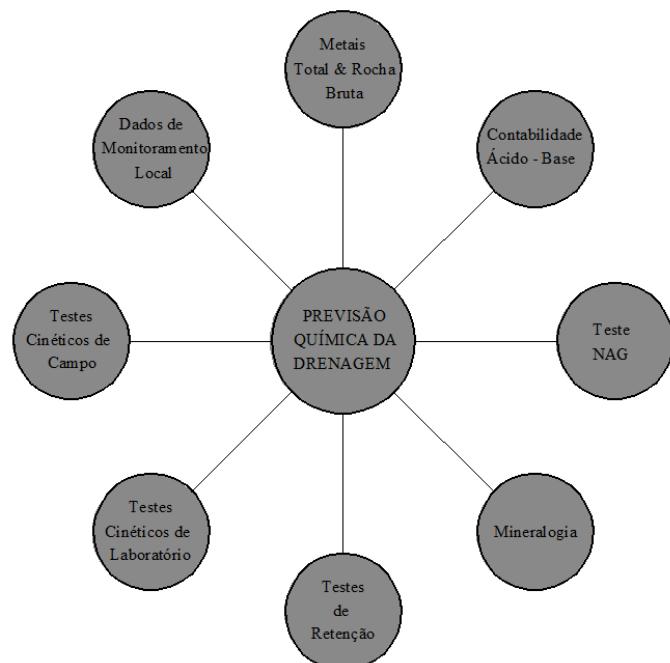
Fases da Mina	Número de Amostragens	Tipos de Ensaio
Exploração – Prospecção	3 a 5 amostragens por tipo litológico	Ensaios Estáticos
Exploração – Definição de Recursos	3 a 10 amostragens por tipo litológico	Ensaios Estáticos
Pré viabilidade	Centenas de amostragens, sendo de 1 a 2 de cada tipo litológico	Ensaios Estáticos Ensaios Cinéticos
Planejamento, Viabilidade e Projeto da Mina	Conforme necessário para refinamento de cada etapa	Conforme necessário

Fonte: (GARD Guide, 2009)

A quantidade de amostras a serem coletadas varia conforme a fase da mina (prospecção, operação e encerramento), bem como aos tipos de ensaios a serem realizados (Figura 3).

Nos ensaios de predição é fundamental se ter uma caracterização dos materiais geológicos, geológicos, visando amostrar e ensaiar os diferentes tipos litológicos existentes na área (Tabela 2), como exemplo da distribuição dos recursos minerais no Brasil, conforme Figura 4.

Figura 3 – Tipos de testes realizados na predição da DAM



Fonte: (Morin e Hutt, 1998).

Tabela 2 – Características principais dos sulfetos

Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa
Pirita	FeS ₂	4,95 - 5,10 g/cm ³
<u>Composição</u> : 46,6 % Fe, 53,4 % S, pode conter pequenas quantidades de níquel e cobalto		
<u>Ocorrências</u> : AM, BA, CE, GO, TO, MA, MT, MS, MG, PR, PE, RS, RN, RJ, SC e SP		
<u>Usos</u> : Pode ser minerada pelo ouro e o cobre associados. Mas tem variados usos na indústria: para fornecer enxofre para a fabricação de H ₂ SO ₄ . Também como fonte de ferro.		
Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa
Arsenopirita	AsFeS	5,9 - 6,2 g/cm ³
<u>Composição</u> : Fe 34,3%, As 46%, S 19,7%		
<u>Ocorrências</u> : MG e SP		
<u>Usos</u> : é usada com o chumbo em munição, como conservante de couros e madeiras, em pigmentos, pesticidas, esmaltes e vidros.		
Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa
Calcopirita	CuFeS ₂	4,1 – 4,3 g/cm ³
<u>Composição</u> : Cu 34,6%, Fe 30,4%, S 35,0%		
<u>Ocorrências</u> : AL, BA, GO, MT, MG, PA, PB, PR, RN, RS, SC e SP.		
<u>Usos</u> : Fonte do metal cobre.		
Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa
Pirrotita	FeS	4,50 – 4,87 g/cm ³
<u>Composição</u> : Fe 60,4%, S 39,6%. Sulfeto de ferro, Fe _{1-x} S, com x entre 0 e 0,2		
<u>Ocorrências</u> : PI		
<u>Usos</u> : um mineral usado como matéria-prima para fabricação de ácido sulfúrico, podendo ainda ser fonte de Ni e Co.		
Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa
Galena	PbS	7,40 – 7,60 g/cm ³
<u>Composição</u> : 86,6% Pb, 13,4% S. A prata pode estar presente, assim como pequenas quantidades de Zn, Cd, Sb, As e Bi. O selênio pode estar presente substituindo o enxofre.		
<u>Ocorrências</u> : SP, PR, MG, BA, CE, GO, ES, MS, MA, PA, PB, PI, RN, RS e SC.		
<u>Usos</u> : Principal fonte do chumbo. Também é um mineiro importante da prata.		
Mineral	Fórmula Química	Densidade Relativa

Esfarelita	ZnS	3,90 – 4,10 g/cm ³
<u>Composição:</u> Zn 67% e S 33% quando pura. Comumente contém ferro em até 36%, pela associação com sulfetos de ferro. Pode ter pequenas quantidades de Mn e Cd.		
Ocorrências: SP, PR, MG, BA, CE, RS, GO, MT, PA e RR.		
<u>Usos:</u> Importante mineiro de zinco. Também serve como fonte de outros metais raros.		

Fonte: (adaptado de Duarte, 2011)

Nestes ensaios pode-se obter diagnósticos do comportamento dos diversos sistemas naturais, que variam para cada tipo de jazida (

Figura 4), e para cada tipo de rocha de uma mesma jazida inclusive, não sendo possível a utilização da mesma metodologia, ainda que com mesmo propósito de caracterização com um único conjunto de testes ou número de amostragens, que garanta a predição absoluta da DAM (Chelidze et al., 2023).

Figura 4 – Recursos Minerais do Brasil



Fonte: Serviço Geológico do Brasil - CPRM

A predição é uma ferramenta importante e econômica, pois danos ambientais podem ser significativamente reduzidos e tratados em fase inicial do projeto, para a identificação prematura de compostos que sejam potencialmente geradores de DAM, como ocorreu na fase de projeto de uma barragem em MG (Duarte, 2011),

Embora não seja atividade de mineração, foram conduzidos estudos durante fase de implantação da UHE (Figura 5) como: investigações hidrogeotécnicas, mineralógicas e geoquímicas, visando caracterizar e quantificar o teor dos sulfetos, bem como identificar os mecanismos envolvidos no seu processo de oxidação, avaliando a sua influência sobre as estruturas da usina e o meio ambiente. Após detecção da presença de sulfetos foram adotadas soluções de engenharia tais como a implantação de estruturas de confinamento por meio da utilização de materiais sintéticos como instrumento de proteção e de impermeabilização de maciços, preenchendo uma lacuna do projeto.

Figura 5 – Usina Hidrelétrica Irapé



Fonte: (ALC Lima, 2009)

Muito embora para a determinação da DAM não exista ainda um ensaio específico utiliza-se como base e de forma complementar, uma gama de testes recomendados pela literatura, que conjugados permitem a execução de diversos ensaios químicos e geoquímicos, tais como: análises químicas e mineralógicas; ensaios preliminares; ensaios geológicos e geotécnicos; métodos Balanço Ácido Base Modificado (BABM); métodos da Relação Potencial de Produção Alcalina PPA/S Total.

A Tabela 3 exibe os métodos utilizados na predição da DAM, segundo Mend Program (1991). A compreensão das técnicas de predição e dos fatores físicos e químicos que controlam a DAM permite identificar o potencial de geração de acidez, assim como fazer uma estimativa da qualidade da água de drenagem.

Os modelos de predição de qualidade da drenagem dependem de ensaios, por critérios obtidos em laboratório a partir dos experimentos de reações de geração de acidez. Os resultados obtidos são extrapolados para as condições de campo, tendo como base a

interpretação adequada da relação entre os valores dos testes de laboratório e das condições de campo bem como dos fatores físicos e químicos que controlam a DAM (Summers and Bonelli, 1997).

A preocupação fundamental com respeito a DAM são os níveis elevados de acidez, sulfato e a lixiviação de metais potencialmente tóxicos associados com o mineral sulfetado. A preocupação ambiental é o impacto adverso dos contaminantes, particularmente os metais dissolvidos, na vida aquática do meio receptor e na qualidade da água potável (Summers and Bonelli, 1997).

Tabela 3 - Métodos utilizados na predição da DAM

<i>Métodos em Função do Enxofre</i>		
<i>Método</i>	<i>Abreviação</i>	<i>Referência</i>
<i>Dissolução Seletiva Pirita / Pirrotita</i>	<i>Py / Po</i>	<i>McLachlin 1934</i>
<i>HNO₃ Oxidação / Análise de Sulfato</i>	<i>HNO₃ / Oxd. / Sulfato</i>	<i>N/a</i>
<i>Sulfuro - Lixiviação Seletiva / AA Análise de Metais</i>	<i>KClO₃ - HCl Lx.</i>	<i>Olaide e Fletcher 1974, 1976</i>
<i>Microscópio Eletrônico</i>	<i>Microscópio Eletrônico</i>	<i>N/a</i>
<i>Análise Diferencial Térmico - Envolvi análise de Gás</i>	<i>ADT - EAG</i>	<i>N/a</i>
<i>Difração Quantitativa de Raio X</i>	<i>DRX Quantitativa</i>	<i>N/a</i>
<i>Difração Qualitativa de Raio X</i>	<i>DRX Qualitativa</i>	<i>N/a</i>
<i>Oxidação da Pirita com H₂O₂</i>	<i>Oxidação H₂O₂</i>	<i>Finkelmann e Giffen 1986</i>
<i>Atomização Slurry / ICP Análise de Metais</i>	<i>Slurry / ICP Metals</i>	<i>Foulkes 1988; Haltz e Brenner 1987</i>
<i>Fusão Na₂O₂ / Análise Sulfeto por Cromatografia Iônica</i>	<i>Cromatografia Iônica</i>	<i>Stallings et. al. 1988</i>
<i>Enxofre Total por Combustão em Forno Leco</i>	<i>Leco - Enxofre Total</i>	<i>N/a</i>
<i>Digestão NaOH / ICP Análise de Metais</i>	<i>NaOH / ICP Metals</i>	<i>Floyd et. al. 1980</i>
<i>Separação de Minerais</i>	<i>Separação de Minerais</i>	<i>N/a</i>
<i>Digestão, HCl - HNO₃ / ICP Análise de Metais</i>	<i>HCl - HNO₃ / ICP Metals</i>	<i>Zeng et. al. 1986</i>
<i>Espectroscopia de Fluorescência Raio - X</i>	<i>FRX</i>	<i>Fabbi e Moore 1970</i>
<i>Digestão Na₂OBr / ICP Análise de Enxofre</i>	<i>Digestão / ICP Enxofre</i>	<i>Pritchard e Lee 1984</i>

<i>Métodos em Função da Capacidade de Neutralização dos Minerais</i>		
<i>Método</i>	<i>Abreviação</i>	<i>Referência</i>
<i>Digestão HCl / AA Análise de Metais</i>	<i>HCl / AA Metals</i>	<i>N/a</i>
<i>Digestão HCl / ICP Análise de Metais</i>	<i>HCl / ICP Metals</i>	<i>N/a</i>
<i>Difração Quantitativa de Raio X</i>	<i>DRX Quantitativa</i>	<i>N/a</i>
<i>Difração Qualitativa de Raio X</i>	<i>DRX Qualitativa</i>	<i>N/a</i>
<i>Métodos Clássicos (Volumétrico, Gravimétrico, Titulação)</i>	<i>Métodos Clássicos</i>	<i>Vários</i>
<i>Manometria de Carbonatos</i>	<i>Manometria de Carbonatos</i>	<i>Evangelou et. al. 1985</i>
<i>Análise Diferencial Térmico - Envolvi Análise de Gás</i>	<i>ADT - EAG</i>	<i>Vários</i>
<i>Microscópio Eletrônico</i>	<i>Microscópio Eletrônico</i>	<i>N/a</i>
<i>Testes de Investigação de consumo de ácido B.C</i>	<i>BCR Consumo de Ácido</i>	<i>N/a</i>
<i>EPA Potencial de Neutralização</i>	<i>EPA - PN</i>	<i>Sobek et al. 1978</i>
<i>Coulometria Carbonatos</i>	<i>Coulometria Carbonatos</i>	<i>Morrison 1990; Sviridenko 1983</i>
<i>Decomposição com água regia / ICP Análise de Metais</i>	<i>Água Regia / ICP Metals</i>	<i>Geddes Resources 1990</i>
<i>EPA - PN Procedimento Modificado por Coastech</i>	<i>Modificado PN - Coastech</i>	<i>MEND 1990</i>
<i>EPA - PN Procedimento Modificado por adição H₂O₂</i>	<i>Modificado PN - H₂O₂</i>	<i>Morrison et al. 1990</i>
<i>Testes de Impurezas no Carbonato</i>	<i>Testes de Impurezas</i>	<i>N/a</i>
<i>Petrologia</i>	<i>Petrologia</i>	<i>N/a</i>
<i>Teste Fizz- Adicionando HCl</i>	<i>Teste Fizz</i>	<i>N/a</i>
<i>Determinação Total de Metais</i>	<i>Metals Total</i>	<i>N/a</i>
<i>Carvão Total Por Combustão em Forno LECO</i>	<i>Leco C Total</i>	<i>N/a</i>
<i>Separação de Minerais</i>	<i>Separação de Minerais</i>	<i>N/a</i>

Fonte: Mend Program, 1991

4.3 Métodos Analíticos

4.3.1 Análise Granulométrica

Nesta caracterização leva-se em conta principalmente o tamanho das partículas do material analisado, pois quanto menor for a granulometria do material maior será a superfície de contato com a água, e isso refletirá nas reações químicas para geração da DAM. Por outro lado, partículas mais grossas irão favorecer a infiltração na pilha de rejeito permitindo a passagem de água e contato desta com os minerais sulfetados, caso essa pilha não tenha cobertura e nem tenha sido compactada. (Udvardi et. al., 2017).

4.3.2 Análise Mineralógica

A caracterização mineralógica é fundamental na previsão de DAM, pois por meio dela é possível saber se os minerais presentes no corpo rochoso são passíveis de gerarem a DAM ou não. Além do mais permite a quantificação das fases presentes, da distribuição desses elementos nos minerais e definem quais são os minerais de interesse seja por valor econômico ou mesmo pela sua nocividade ao meio ambiente, podendo impactar negativamente sua exploração. Aqui, também é possível avaliar a presença de sulfetos, carbonatos e outros minerais geradores ou neutralizadores da DAM (NEUMANN et al., 2004).

Para a execução desta etapa a análise é feita por diversas técnicas analíticas para a identificação dos minerais, por exemplo, as microscopias óptica e eletrônica de varredura, microssonda eletrônica, a difração de raios X e a espectroscopia por fluorescência de raios X. (Arantes et. al., 2014).

4.3.3 Análise Química

Determinação das concentrações dos seus constituintes, por meio de diferentes técnicas é de fundamental importância na avaliação da DAM e na avaliação da contaminação produzida por ela. Neste caso, diferentes técnicas são usadas, métodos semi-quantitativos (como a fluorescência de raios x - FRX), como métodos quantitativos com Absorção Atômica (AA), Espectroscopia (ICP/OES e ICP/MS), entre outros. Além da quantificação da concentração de cada elemento, é importante avaliar o potencial impacto destes constituintes no meio ambiente, para isso são usados ensaios de Solubilização e Lixiviação, sendo que não há normas específicas no Brasil para resíduos de mineração, assim são utilizadas as normas de resíduos sólidos (ABNT 10.005 e 10.006). Entretanto em outros países já são utilizados ensaios como EPA 1311 / EPA 1312 / EPA 1313 e EPA1316 (BISSACOT, 2014).

4.3.4 Indicadores específicos da qualidade da água relacionada a DAM

Segundo Farfan (2004), a amostragem, caracterização e monitoramento das águas superficiais e efluentes gerados na DAM podem ser comparados com os parâmetros listados na Tabela 4, para tal, no Brasil encontramos embasamento nas resoluções CONAMA, que se seguem:

357/2005: 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.

397/2008: 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.

420/2009: Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

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.

Tabela 4 – Indicadores de Qualidade de Água com DAM

Aspectos	Impactos	Indicadores
Drenagem Ácida	<ul style="list-style-type: none">- Acidificação das águas superficiais- Redução de produtividade biológica nos rios- Aumento de concentração de metais nas águas dos rios- Contaminação de águas subterrâneas	<ul style="list-style-type: none">- pH, Eh, condutividade elétrica- Oxigênio dissolvido- Concentração de metais potencialmente tóxicos- Sólidos em suspensão- Concentração de sulfato

Fonte: adaptado de CETEM

4.4 Ensaios Estáticos

Em decorrência da necessidade de prever se uma mina irá gerar drenagem ácida os ensaios estáticos permitem certa rapidez de resultado, e fez com que centros de pesquisa desenvolvessem metodologias para este fim, foi quando Sobek et al. (1978) desenvolveram o ABA (Balanço Ácido Base). São ensaios simples e que embasam os parâmetros para realização dos ensaios cinéticos. São utilizados até os dias atuais, entre os principais ensaios temos o Acid Base Accounting (ANC), Balanço Ácido Base Modificado (BABM) e Net Acid Generation (NAG). Na Tabela 5 são listados os principais ensaios estáticos para predição da DAM.

Tabela 5 – Tipos de ensaios estáticos para predição da DAM

CQ – Caracterização Química CM – Caracterização Mineralógica EC – Ensaio Cinético EE – Ensaio Estático			
DRX	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Difrataometria de raios X	Utilizado para uma análise qualitativa	CM
FRX	<u>Vantagem:</u> rapidez do método, a necessidade de pequenas quantidades de amostra, possibilidade de realizar uma análise de minerais e materiais com mistura de fases mineralógicas. <u>Desvantagem:</u> Não pode ser localizada em uma micro-região / Pouco sensível para elementos leves / Diferencia pouco entre elementos com números atômicos próximos		
	Descrição	Aplicabilidade	Uso
BABM	Fluorescência de raios X	Identificam quais elementos estão presentes e suas concentrações.	CQ
	<u>Vantagem:</u> Simplicidade da técnica, a rápida detecção dos elementos químicos e o seu baixo custo comparado com outras técnicas. <u>Desvantagem:</u> Contudo, esta técnica apresenta certas limitações, dependendo do equipamento utilizado, visto que elementos com ($Z < 11$) podem não ser detectados		
BABM	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Modified Acid Base Accounting	Fornece a quantificação das concentrações de enxofre na forma de sulfetos e sulfatos presentes na amostra	EE
<u>Vantagem:</u> realização em período curto e baixo custo.			

	<u>Desvantagem:</u> mede somente a capacidade de produção e consumo de ácido, não considera as diferenças entre as respectivas taxas de dissolução de minerais produtores de ácido e neutralizadores		
MEV/EDS	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Microscopia eletrônica de varredura / Espectroscopia por Dispersão de Elétrons	Analizar a microestrutura e a composição química de materiais em escala micro e manométrica.	CQ
	<u>Vantagem:</u> análise direta de bordas ou contornos de grãos e, também, em seções polidas <u>Desvantagem:</u> só concede uma aproximação da composição de partículas em componentes elementar		
Microscopia Óptica	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	-	Determinar quais são minerais de interesse e os rejeitos	CM
	<u>Vantagem:</u> amplamente utilizado <u>Desvantagem:</u> comprimento de onda limitado.		
Microssonda Eletrônica	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	O equipamento combina os princípios do microscópio eletrônico, microscopia óptica e fluorescência de raios X	Determinação da composição química de um material em uma dada região com aproximadamente 1 μm de diâmetro	CM
	<u>Vantagem:</u> a técnica que permite a determinação de fases coexistentes, lamelas de resolução, inclusões, alterações e zoneamentos <u>Desvantagem:</u> pode ocorrer difração secundária.		
ICP-MS	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado	Determina a carga potencial total de constituintes para o meio ambiente	CQ
	<u>Vantagem:</u> maior número de elementos analisados por amostra em um determinado tempo. <u>Desvantagem:</u> baixa tolerância a sólidos dissolvidos e acidez.		
ICP-OES	Descrição	Aplicabilidade	Uso

	Espectrometria de emissão óptica com plasmas indutivamente acoplado	Determina a carga potencial total de constituintes para o meio ambiente	CQ
	<u>Vantagem:</u> técnica de análise rápida e de menor custo que o ICP-MS		
	<u>Desvantagem:</u> mais facilmente afetado por interferências matriciais.		
	Descrição	Aplicabilidade	Uso
NAG Test	Net Acid Generation	Avaliar capacidade da amostra em neutralizar a acidez pela oxidação de sulfetos	CC
	<u>Vantagem:</u> avalia o equilíbrio ácido-base líquido Geralmente é relativamente rápido e barato. Pode fornecer uma estimativa qualitativa do tempo de atraso aproximado até a geração de ácido. Fornece estimativa qualitativa da cinética da reação e do tempo de atraso (ou seja, semanas, meses, anos)		
	<u>Desvantagem:</u> Não faz distinção entre AP e NP. Possíveis interferências na presença de carbono orgânico e cobre. Pode subestimar o potencial de DAM em materiais com alto teor de sulfeto devido à oxidação incompleta (NAG sequencial aborda esta limitação). A qualidade do H ₂ O ₂ pode variar: algumas marcas de H ₂ O ₂ requerem pré-tratamento para uso de teste NAG		
NBR 10.004/2004	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Resíduos sólidos – Classificação	Classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente	CQ
	<u>Vantagem:</u> Nesta norma se classifica os resíduos sólidos sobre amostragem, caracterização e classificação sobre seus potenciais ao meio ambiente e à saúde pública <u>Desvantagem:</u> Não representa fielmente o ambiente natural de mineração quanto a variação do clima, tipologia dos resíduos e composição ambiental		
NBR 10.005/2004	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos	Fixa requisitos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos	EE

	<u>Vantagem:</u> Utilizado de forma complementar para avaliação de rejeitos inerentes a DAM <u>Desvantagem:</u> Não representativa para ambiente de mineração		
NBR 10.006/2004	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos	Fixa requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos	CQ
	<u>Vantagem:</u> Utilizados de forma complementar para avaliação de rejeitos inerentes a DAM <u>Desvantagem:</u> Não representativa para ambiente de mineração		
SPLP	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Synthetic Precipitation Leaching Procedure	Determinar a mobilidade de ambos os analitos, orgânicos e inorgânicos presentes em solos e resíduos.	EE
	<u>Vantagem:</u> Fornece indicação de lixiviação de curto prazo de constituintes solúveis. Identifica constituintes facilmente solúveis		
	<u>Desvantagem:</u> Não fornece informações sobre processos transitórios e condições de longo prazo. Simula apenas interação de curto prazo. Alta relação líquido/sólido pode subestimar a lixiviação. A redução do tamanho do grão pode aumentar a reatividade		
TCLP	Descrição	Aplicabilidade	Uso
	Procedimento de lixiviação característica de toxicidade	Detectar presença de elementos perigosos lixiviáveis em um resíduo	EE
	<u>Vantagem:</u> Padrões aplicáveis disponíveis		
	<u>Desvantagem:</u> Uso de tampões de ácido acético/acetato não apropriados para aplicações em mineração		

Fonte: Guide Gard, 2009 (adaptado)

4.5 Ensaios Cinéticos

Os ensaios cinéticos consistem em procedimentos que buscam acelerar o processo de intemperismo, sendo capazes de determinar o comportamento da amostra nas condições ambientais e a velocidade com que ocorre o processo de formação de ácido. Estabelecem taxas relativas de geração de ácido e de neutralização.

Devido ao tempo maior de realização, geralmente semanas e/ou anos, os custos elevados podendo promover a redução do número de amostras. Têm por finalidade equiparar os resultados obtidos nos métodos estáticos; comparar o comportamento da lixiviação dos diferentes tipos ou classes de rocha na mina; prever a qualidade da água de drenagem dos tipos de rocha e pilha de estéril; definir as opções de disposição e controle; indicar as condições do lugar para determinar os fatores que controlam a DAM e proporcionar assim os dados primários para a confecção do modelo matemático (Summers and Bonelli, 1997).

4.5.1 Ensaios em células úmidas

As amostras são expostas à oxidação, e são lavadas com água deionizada após um determinado período de tempo e a solução é analisada quanto aos solutos, representando os produtos da reação do processo de oxidação. No teste de célula de umidade ASTM D5744-96 mais aplicado, uma amostra de um quilo com tamanho de grão < 6,3 mm é exposta a 3 dias de ar úmido, 3 dias de ar seco e no sétimo dia o sistema é lavado com água que é então analisada para parâmetros físico-químicos e concentrações de elementos. Recomenda-se que esses ciclos sejam repetidos 20 a 25 vezes para relatar a evolução do pH, Eh e elementos dissolvidos como sulfato e Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, As, Cr, entre outros (Dold, 2017).

4.5.2 Free Leach

Os testes de coluna monitoram a qualidade do lixiviado ao longo do tempo por meio de amostragem cíclica (semanal ou mensal). Os dados são coletados sobre a reatividade do sulfeto, a cinética de oxidação, a solubilidade do metal e o comportamento de lixiviação dos materiais de teste (Lottermoser et. al., 2015).

4.5.3 Ensaios de lisímetros

Os lisímetros são compartimentos que podem ter diversos formatos, quadrangulares, cilíndricos e que possam confinar volume necessário para a amostragem e análise dos lixiviados, suscetíveis a ensaios específicos cujo objetivo é a determinação da magnitude e a velocidade das reações envolvidas no processo de oxidação dos sulfetos, bem como confirmar o resultado dos ensaios estáticos e prever a qualidade dos efluentes gerados a partir das amostras (Duarte, 2011).

4.6 Sistemas de Coberturas

Existem vários métodos de prevenção que visam a minimizar os impactos ambientais causados pela DAM, porém deve-se, preferencialmente, combater a sua formação, evitando o

contato entre a água, o oxigênio e os sulfetos. Esses processos de limitação do contato são denominados de coberturas úmidas e coberturas secas (Barros, 2012).

Mundialmente utilizado, os métodos de cobertura secas e úmidas empregados como limitante deste contato são estratégias eficientes para mitigação do fenômeno e se caracterizam conforme segue:

Coberturas úmidas: consiste na cobertura das áreas de disposição de resíduos com uma lâmina d'água. A deposição de material gerador de acidez na água tem o coeficiente de difusão de oxigênio inferior ao seu coeficiente na atmosfera, desta forma a disposição subaquática desse material pode evitar a oxidação por meio impedindo a entrada de oxigênio no sistema.

Coberturas secas: são coberturas sob dos resíduos reduzindo a penetração do oxigênio e da água em seu interior por meio do uso de materiais sólidos (Ritchie, 1994).

A avaliação da eficiência dos sistemas de coberturas secas para prevenção da DAM passa necessariamente por estudos experimentais, quer seja em laboratório, quer seja em campo vide *Tabela 6*. Na literatura muitas vezes são mencionados experimentos dessa natureza em lisímetros (Mello e Abrahão, 1998; Pinto e Nepomuceno, 1998; Ritcey, 1989).

Tabela 6 – Classificação coberturas secas para efeito de inibição de DAM

Classificação das coberturas	Papel principal na inibição da DAM
Barreiras de transporte de oxigênio	- atuam de forma a reter a umidade e fornecer uma barreira de baixo coeficiente de difusão do oxigênio gasoso
Barreiras de consumo de oxigênio	- atuam como uma fonte de consumo de oxigênio de forma a fornecer baixa concentração de oxigênio na interface cobertura / resíduo
Barreiras de inibição da reação	- atuam de forma a inibir reações, neutralizando o pH
Barreiras para armazenamento e liberação de umidade	- atuam de forma a minimizar o fluxo de umidade de camada argilosa por meio por meio da maximização do armazenamento próximo a superfície e posterior liberação por evapotranspiração

Fonte: (Souza, Borma e Mendonça, 2003)

As coberturas secas são classificadas conforme o número de camadas utilizadas. As coberturas simples são aquelas executadas com camada de solo local não compactado, projetadas para dar suporte a vegetação em depósitos de resíduos não reativos.

As coberturas compostas são aquelas constituídas por várias camadas de solo ou materiais alternativos (podendo ser geossintéticos e de outros resíduos de atividades mais inertes) cuja finalidade principal é controlar as reações dos agentes da drenagem ácida de mina. Estas coberturas devem apresentar propriedades como: controle de entrada de água e oxigênio; ser resistente e fornecer suporte a vegetação; camadas bem compactadas; espessura de 0,5 a 1,5m; quanto mais impermeável melhor e resistência ciclo umedecimento e secagem, conforme mostra a *Figura 6*.

Figura 6 – Exemplo de cobertura seca em área com DAM



Fonte: CETEM, 2004

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, para se alcançar os objetivos propostos foi realizada uma revisão sistemática usando as bases de dados do Dedalus, Google Acadêmico, Scopus. Para a busca nas respectivas plataformas foram utilizadas as seguintes combinações de palavras chave: drenagem ácida de mina; métodos de predição de drenagem ácida de mina; ensaios estáticos e cinéticos; coberturas secas e predição, tanto em português como em inglês.

Pela metodologia aplicada, foi possível encontrar número expressivo de publicações para este trabalho, em seguida aplicou-se uma seleção criteriosa de trabalho dos últimos 15 anos e que englobasse pelo menos uma amostra representativa de cada continente e o resultado das combinações conforme apresentado na Tabela 7, resultaram na quantidade dos estudos relacionados, considerando que a pesquisa foi feita utilizando obrigatoriamente ambas as palavras-chave: “Acid mine drainage”, seguido por “Acid mine drainage prediction” e “Acid mine drainage prediction methods”.

Numa etapa seguinte, com base na relevância do título realizou-se uma seleção após leitura do resumo de cada obra escolhida, das respectivas menções e por fim na leitura completa dos trabalhos. Àqueles que corresponderam objetivamente aos questionamentos que fundamentaram esta pesquisa como: “Apresenta métodos de predição para controle da drenagem ácida de mina?” “foram escolhidos com base do tema desta revisão que é evolução de estudos correlatos a prevenção de DAM?”.

Aqueles que foram descartados deste estudo, como critério de exclusão foi estabelecido a generalidade do assunto ou mesmo a temas não correlatos, uma vez que as palavras “cinético”, “estático” ou “predição” abarcam áreas específicas de outros segmentos da ciência, tecnologia e saúde.

Por fim, foi realizada uma leitura analítica, com base nas práticas recomendadas pelo GARD Guide, referentes a predição e das normativas vigentes em países com histórico de práticas minerárias. Foi compilado estudos representativos de diferentes regiões: África, América, Ásia, Europa e Oceania.

Tabela 7- Literaturas relacionadas aos Métodos de Predição

	África	Américas	Brasil	Ásia	Europa	Oceania
Trabalhos selecionados	2	11	5	10	1	2
Total Geral da Busca	118					

Fonte: do autor

5.1 Ferramentas de busca

5.1.1 Dedalus

O Sistema Dedalus é um catálogo geral de consulta que permite pesquisar todas as obras de interesse acadêmico e geral, distribuídas pelos acervos das bibliotecas da Universidade de São Paulo (USP). Possui base de dados com mais de 16.000 periódicos, artigos científicos, livros e revistas de diversas áreas de conhecimento, disponibiliza trabalhos de parceiros externos – outras instituições de ensino qualificadas como referência no ramo de pesquisa.

5.1.2 Google Acadêmico

No Google Acadêmico é possível encontrar periódicos, artigos acadêmicos, jornais universitários, anais de eventos e até trechos de livros acadêmicos. A ferramenta é uma das mais usadas pela quantidade de informação disponível, de acesso livre.

5.1.3 Scopus

Trata-se do banco de dados mais completo deste segmento, são livros, publicações e revistas que abrangem temáticas das artes, ciências e tecnologia. Desperta atenção da comunidade acadêmica pela avaliação adicional feita para aprovação e disponibilização na plataforma. Por pertencer editora, engloba outras bases de dados como ScienceDirect, e engloba também o banco de dados da Springer. O acesso foi feito mediante cadastro ativo da USP.

6 RESULTADOS

Como resultado buscou-se correlacionar as diferentes abordagens dadas aos métodos de prevenção e tratamento da DAM em nível mundial, e os critérios na escolha do melhor método de acordo com seu contexto geológico e geomorfológico. Embora o número de estudos científicos analisados por esse trabalho tenha sido reduzido em termos quantitativos, a resposta em termos qualitativos foi muito satisfatório. Os artigos foram de grande relevância para esta revisão, possibilitando uma comparação entre os selecionados e a compreensão dos resultados obtidos nos estudos científicos, de modo a entender os motivos que levaram os autores a essa escolha.

O fenômeno de drenagem ácida de mina ocorre em todo o mundo e foi observado como lacunas ainda existentes em relação aos métodos de sua determinação, uma certa obsolescência quanto aos ensaios praticados.

Uma gama deles ensaios que são aplicados para diagnosticar a predição da drenagem ácida de mina, subdividindo-se em ensaios estáticos e ensaios cinéticos. Sumariamente os ensaios estáticos avaliam se uma amostra produzirá ou não um ambiente ácido, ao passo que os ensaios cinéticos avaliam quando ocorrerá a acidificação e quais elementos serão liberados no fenômeno.

Entretanto, ainda que sejam práticas recomendadas pelo GARD Guide, há consideráveis elementos que os tornam insuficientes para uma eficiente caracterização seja ela mineralógica ou química. Nesta revisão sistemática, foi observada também uma certa deficiência normativa específica no setor de mineração, a citar, os ensaios que tratam de resíduos no Brasil, estes que ao se avaliar potencial de contaminação dos rejeitos são realizados de forma adaptada e complementar utilizando normativa de resíduos sólidos.

Observou-se uma certa unanimidade dentre as literaturas revisadas em questões de sustentabilidade, conforme critica Baloyi (2023) sobre as lacunas em tecnologias preditivas e preventivas utilizadas na África do Sul, que também aborda o uso sustentável de recursos provenientes da lama, como reutilização da água e à recuperação de recursos valiosos, como ácido sulfúrico, elementos de terras raras e metais. A extração de ouro e carvão, e consequentemente o abandono destes sítios mineradores são os tipos de mineração no país, que contribuem predominantemente para a poluição da DAM e suas áreas de impacto.

Parbhakar-Fox et al. (2015), sugerem uma nova arquitetura de testes de previsão escalonados e integrados, começando com a melhoria da definição de modelos geoambientais e unidades de resíduos. Então, uma série de testes rápidos e de baixo custo para a triagem de

amostras poderiam ser realizados no local antes da realização de testes estabelecidos e análises avançadas utilizando laboratórios de última geração.

Para a predição a abordagens traz limitações específicas e deficiências dos métodos, já que nem todas as técnicas são necessárias ou mesmo possíveis num local de mina, dependendo da fase das operações.

Atualmente, a indústria de mineração depende predominantemente de métodos de testes geoquímicos estáticos estabelecidos na década de 1970 para prever a DAM. Foram encontrados diversos métodos utilizados na prevenção da drenagem ácida de mina, propostas e elucidações dos principais efeitos danosos no meio ambiente e a saúde humana, que serão abordados nos próximos tópicos.

6.1 Formação, controle e tratamento de drenagem ácida de minas: abordagens e estratégias – Estados Unidos, 2019

Até 1990, na região leste dos Estados Unidos - país vanguardista na aplicabilidade de testes e legislação para predição e tratamento da DAM - foram mais de 10.000 km² de riachos e 72.000 hectares de lagos e reservatórios afetados, provenientes em sua maioria de minas abandonadas ou deixadas sem recuperação (Skousen et. al., 1987). Em 1997, o país estabeleceu legislação impeditiva à licença de empreendimentos que gerariam poluentes pós-mineração ou sem remediação, e com isso iniciou incentivos ao desenvolvimento de métodos de prevenção. Destaca os ensaios de contabilidade Acido-Base e a importância dos ensaios cinéticos como os das células úmidas e os ensaios de coluna, pois estes avaliariam taxas de produção de ácido e as reações de neutralização (GEIDEL et. al., 2000).

Skousen et. al. (1987), também citam alguns tratamentos químicos utilizando diferentes materiais como uso das cinzas da combustão e/ou geração de energia como potencial material de neutralização, indicando seis compostos: (Calcário / Cal / Cal virgem / Carbonato de sódio / Soda cáustica / Amônia) que auxiliam na remediação da DAM, sendo cada qual apropriada para um conjunto de condições específicas, fatores técnicos (nível de acidez, fluxo, tipos e concentrações de metais, características do fluxo receptor) e fatores econômicos.

Skousen et. al. (1987), abordam os tipos de controle da DAM, tais como: recuperação do solo com aterramento (requalificando o contorno) atrelados a um processo de cobertura seca, podendo ser um método eficaz para reduzir as cargas ácidas de perturbações / terras.

Na Figura 7, exemplo de um riacho impactado por drenagem ácida de mina, mostra a zona de confluência de águas ácidas de Cement Creek são descarregadas no rio Animas, precipitando de hidróxido de ferro e alumínio de tamanho coloidal.

Figura 7 – Rio Animas, Colorado, USA



Fonte: USGS

6.2 Desafios e caminhos para tratamento, beneficiamento e valorização da drenagem ácida de minas na economia circular: uma revisão – África do Sul, 2022

Em sua revisão, Masindi, et al. (2022), focaram em sustentabilidade e sistemas híbridos. Neste contexto estes autores chamam a atenção para os efeitos danosos da DAM, em especial a exposição a substâncias tóxicas, que podem alterar o metabolismo das plantas atividades, homeostase e induzir sintomas tóxicos, bem como desestabilizar o equilíbrio de sal, citam que a acidez reduz o pH dos ecossistemas receptores, o que aumenta a mortalidade de alguns organismos, como peixes e plantas e/ou força as espécies a migração.

Estes autores fazem associação dos efeitos da DAM com lesões de pele, hiperpigmentação, câncer, problemas respiratórios, gastrointestinais e cardiovasculares, juntamente com problemas no sistema nervoso e falência de múltiplos órgãos.

Masindi, et al. (2022), comentam sobre várias técnicas de prevenção e redução da DAM, tais como: utilização de materiais de cobertura em minas em operação e em minas abandonadas, utilizando argila ou outros materiais impermeabilizantes; estabilização usando materiais alcalinos aos rejeitos, realização de testes estáticos para potencial de geração de ácido e seu potencial de neutralização. Estes autores ainda citam o microencapsulamento (Figura 8), porém fazem ressalva ao seu uso devido a possibilidade de exposição pelo material encapsulado junto aos microrganismos, o que pode degradar este encapsulamento tornando-o inviável.

Figura 8 – Exemplo de microencapsulamento de resíduo gerador de DAM



Fonte: In the Mine

6.3 Drenagem Ácida de Minas: Desafios e Oportunidades – África do Sul, 2014

Simate and Ndlovu (2014) detalham as contaminações nos corpos hídricos por alumínio, arsênio, cádmio, cobalto, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco. No que diz respeito aos seres humanos e animais o perigo destes poluentes na água reside em dois aspectos: persistência nos ecossistemas por período demasiadamente prolongado e acumulação em níveis sucessivos da cadeia biológica, já que os metais potencialmente tóxicos têm uma série de implicações na saúde humana, devido sua toxicidade aguda. A Tabela 8 lista os principais metais potencialmente tóxicos e seus efeitos nas plantas.

Tabela 8 – Principais Metais Potencialmente Tóxicos Associados com a DAM e seus Efeitos nas Plantas

Elemento	Efeito
Cádmio	Reduz a germinação das sementes, conteúdo lipídico e crescimento
Chumbo	Reduz produção de clorofila, crescimento das plantas
Níquel	Reduz a germinação das sementes, acúmulo de massa seca, produção de proteínas, clorofila e enzimas
Mercúrio	Diminuição da atividade de fotossíntese, absorção de água
Zinco	Reduz a germinação das sementes
Cromo	Reduz a germinação das sementes, danifica as membranas e raízes
Cobre	Inibe a fotossíntese, crescimento e processo reprodutivo

Fonte: (Simate and Ndlovu, 2014)

Quanto à vida aquática, Simate and Ndlovu (2014), comentam em seu artigo de revisão que quando o pH é inferior a 5, espécies indesejáveis de plâncton e musgos podem começar a invadir o ambiente e a população de peixes começa a desaparecer (para peixes de água doce, a faixa segura para sua sobrevivência é entre 5–9 e algumas espécies de algas vivem em pH menor que 2) e o fundo dos corpos hídricos consequentemente fica coberto com material não deteriorado e musgos podem começar a dominar e migrar para áreas das margens. A Tabela 99, apresenta várias técnicas de controle de origem que foram avaliadas para prevenir a DAM.

Tabela 9 – Medidas de Prevenção da origem na DAM abordadas nas Literaturas

Medida de Controle	Descrição
Migração da água	A água é interceptada e desviada para evitar que passe pelos resíduos com potencial para formar DAM
Inundação / vedação túneis das minas	Confinamento para evitar entrada de água e ar.
Armazenamento subaquático de rejeitos de minas	A oxidação de resíduos reativos pode ser minimizada pela deposição e armazenamento de resíduos contendo sulfeto sob a água.
Confinamento de rejeitos	Tampas secas, tampas e vedações (incorporando uma camada orgânica) usadas

	para isolar resíduos contendo sulfeto, limitando assim o acesso de oxigênio ou água.
Misturas de resíduos minerais	Mistura de materiais geradores e consumidores de ácido.
Aplicação de aniónico surfactantes	Inibem a atividade bacteriana que catalisa a conversão de ferro ferroso evitando a geração de ácido.
Revestimento de certos resíduos de minas	O revestimento envolve a lixiviação dos resíduos com uma solução de fosfato contendo peróxido de hidrogênio. O peróxido de hidrogênio oxida a porção superficial da pirita e libera óxidos de ferro de modo que a precipitação de fosfato forma um revestimento superficial passivo

Fonte: (Simate and Ndlovu, 2014)

Há destaque para geração de materiais industrialmente úteis a partir da drenagem ácida de mina, após tratamento, tais como: recuperação de metais por precipitação química; recuperação do ácido sulfúrico por meio da eletrodiálise; produção de pigmentos de ferro provenientes do lodo; matérias para construção, dentre outras reutilizações.

6.4 Indicadores Ambientais para Drenagem Ácida de Mina: Avanços no Conhecimento e Desafios Futuros – Austrália, 2012

Lottermoser (2012) enfatiza uma melhor abordagem nos ensaios preditivos para uma melhor caracterização ambiental e consequentemente melhor gestão no processamento da mina. Traz à luz da ciência as primeiras observações de toxicidade para os organismos devido a oxidação da pirita sobre o Rio Tinto, ainda no século XVI e propõe indicadores ambientais como ferramenta para melhor compreensão do fenômeno.

Para indicadores do potencial de formação de ácidos de rochas, minérios e rejeitos aborda a utilização dos ensaios estáticos, como: potencial máximo de acidez; capacidade de neutralização ácida; pH; valor líquido de carbonatos; testes líquidos de geração de ácido e curva de caracterização do tamponamento ácido. Faz críticas sobre os ensaios estáticos e da grande diferença entre as condições dos testes laboratoriais e as condições reais do ambiente.

No que diz respeito aos ensaios cinéticos, Lottermoser (2012), aborda: potencial máximo de acidez; células úmidas; testes de lixiviação de coluna; testes de extração Soxhlet e testes de campo. Ainda sobre os ensaios cinéticos, faz objeções, pois demoram longos períodos para realiza-los, podendo passar de anos, existem limitações também quanto as taxas de formação de ácido. As ferramentas disponíveis de previsão de DAM combinam uma abordagem proativa e bem caracterizada, permitindo as mineradoras atendam requisitos ambientais e minimizem as responsabilidades e riscos decorrentes da disposição dos resíduos. Na Mina de Urânia em Mary Kathleen, Queensland (Austrália) cita o exemplo bem intencionado do fechamento da mina utilizando cobertura seca, porém um ineficaz encapsulamento de rejeitos.

Já na Mina de Ouro, ao norte Queensland (Austrália) para os padrões da época (1987 a 1992) os rejeitos foram dispostos em camadas distintas de forma seletiva visando minimizar responsabilidades futuras, embora tenha sido reconhecido como eficiente, hoje sofre com problemas de lixiviação superficial e contaminação de águas subterrâneas e erosões. Como legado, Lottermoser (2012), elencou alguns erros fundamentais de gestão de resíduos, tais como:

- Projeto de disposição de estéril falho com o encapsulamento de resíduos de sulfetos em resíduos de óxidos, não considerando que a cobertura tinha presença de sulfetos;
- Caracterização, classificação e disposição inadequadas de resíduos durante a fase de mineração, e
- Fiscalização ineficiente no projeto e gerenciamento das obras civis, ocasionando a exposição atmosférica de resíduos sulfetados.

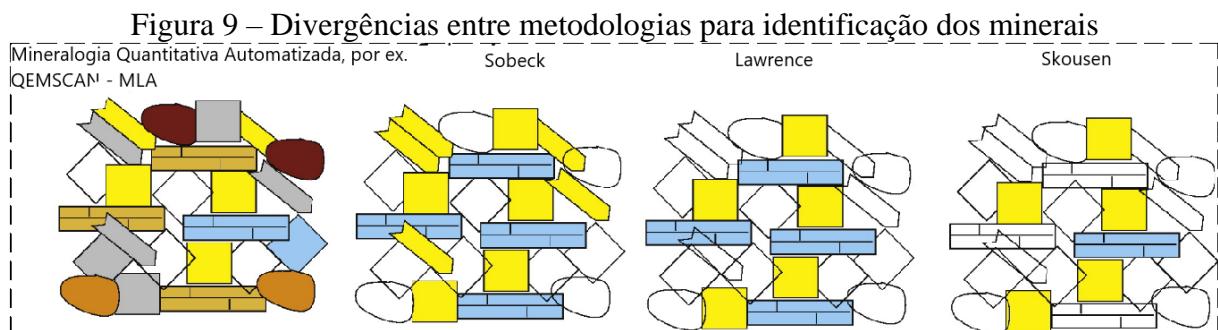
Lottermoser (2012), conclui elencando diversas contribuições favoráveis a previsão da DAM e propõe melhores testes indicativos de DAM com mais precisão ao longo do tempo e a assistência na preparação dos planos de fechamento de minas baseados no conhecimento do local da mina.

6.5 Previsão de Drenagem Ácida de Rocha: Uma Revisão Crítica – Suécia, 2016

Dold (2017) faz uma interessante crítica sobre a não precisão e as limitações dos ensaios estáticos e cinéticos para a previsão da DAM. Dentre eles cita falhas no procedimento ABA, pois o padrão ignora o potencial ácido dos hidróxidos e/ou sulfatos de Fe(III) e não distingue entre diferentes minerais carbonáticos; critica o crescimento da indústria de mineração em nível mundial e consequentemente a geração dos resíduos, mas ressalva a

crescente pressão social que resultaram em implementação pelos governos e as agências estatais cada vez maior de novos regulamentos e leis para regular a gestão de resíduos de mineração em todo o mundo, como por exemplo a lei de encerramento de minas no Chile (em vigor desde Novembro de 2012).

Segundo Dold (2017), o procedimento ABA (Teste Sobek), embora tenha sido desenvolvido para outras necessidades (para mineração de carvão) acabou sendo empregado na mineração de sulfetos metálicos, e ignora o potencial ácido dos hidróxidos e sulfetos de Fe (III) e não distingue entre diferentes minerais carbonáticos. A Figura 9 mostra as divergências nas metodologias aplicadas na identificação das associações mineralógicas.



Fonte: (DOLD, 2017)

Ainda segundo Dold (2017), testes cinéticos muitas vezes não forneceram resultados conclusivos, como mostrado em um estudo na mina de cobre pórfiro de Andina (Chile), onde foi aplicado os testes de células de umidade padrão (ASTM D5744-96), **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Neste estudo, a acidificação foi de forma natural e não atribuída a presença de sulfetos, mesmo que estes tenham sido previstos pelo ABA. Além do mais a dinâmica da cinética é influenciada por diversos fatores, dentre eles atividade bacteriana, disponibilidade de oxidantes, microtexturas, dentre outras.

Dold (2017) argumenta se há de fato necessidade da utilização dos testes cinéticos, uma vez que a mineralogia e a geoquímica sugeriram claramente a DAM. Para este autor, deve ser feita uma revisão completa da literatura das jazidas de minérios, caracterização de dados mineralógicos quantitativos, por meio da mineralogia quantitativa automatizada, utilização de ferramentas analíticas avançadas adicionais para caracterização geoquímica podem ser necessárias, como MEV-EDS, microssonda ou Laser-ICP-MS, onde a concentração de metais vestigiais de minerais específicos pode ser detectada e quantificada e, portanto, sua liberação sob condições geoquímicas específicas pode ser prevista.

Figura 10 - Ensaio de coluna padrão (ASTM D5744-96)



Fonte: (DOLD, 2017)

6.6 Interconectividade de Aquíferos e os Efeitos da Drenagem Ácida de Mina na Qualidade das Águas da Bacia Carbonífera de Santa Catarina – Brasil, 2018

Hoelzel (2018) aborda as consequências da DAM ao longo da bacia do rio Araranguá, como a contaminação dos aquíferos e dos corpos hídricos superficiais. Nesta pesquisa foram utilizadas análises físico-químicas do monitoramento sistemático da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, amostragem das águas e parametrização com mapas geológicos/estruturais, hidrogeológicos e informações hidroquímicas da região estudada.

A partir deste estudo, segundo Hoelzel (2018), conclui-se que as águas subterrâneas e superficiais sofrem influência da DAM devido ao regime hídrico que provoca a modificação das concentrações de sulfato, Fe, Al e Mn originados pela oxidação de sulfetos presentes no rejeito de carvão.

6.7 Ensaios Laboratoriais para Avaliação da Drenagem Ácida da Barragem da UHE Irape – Brasil, 2011

Duarte (2011) comenta que na área de estudo foi realizada ampla caracterização do meio físico e da geologia local, onde foi possível confirmar a geração de DAM. Ensaios estáticos e cinéticos classificaram o potencial gerador de acidez e a partir deles foram implementadas soluções inovadoras contribuindo para o aprofundamento do conhecimento técnico-científico relativo à geração da DAM, mediante ao uso de estruturas de confinamento das porções sulfetadas expostas, por meio de materiais sintéticos – os geossintéticos, para proteção e impermeabilização de maciços.

Cita que além do processo de oxidação depender da presença de oxigênio atmosférico é acelerado pela cinética química provocada por ação bacteriana, Tabela 10 (*Thiobacillus ferroxidans* e *Thiobacillus thiooxidans*), onde a contribuição principal está ligada a oxidação do sulfeto em sulfato, desde que o pH < 3,5 e, neste caso, os efeitos da drenagem ácida de mina também podem afetar as estruturas civis como concretos, enrocamento, drenos etc.

Tabela 10 - Cinética química provocada por ação bacteriana

Bactéria	Características
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	<ul style="list-style-type: none"> - bactéria gram negativa não patogênica, em forma de bastões (bacilo), podendo possuir fimbrias e flagelo polar, o que lhe confere capacidade de locomoção (Dispirito et al., 1982); - Esta bactéria não forma esporos e se reproduz por divisão binária simples (Jensen & Webb, 1994); -
<i>Thiobacillus ferroxidans</i>	<ul style="list-style-type: none"> - principais organismos participantes da oxidação de metais potencialmente tóxicos; - além da oxidação de sais ferrosos, também tiram sua energia de compostos de enxofre reduzidos; - possuem resistência as altas concentrações de metais potencialmente tóxicos.
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	<ul style="list-style-type: none"> - utiliza energia decorrente da oxidação de compostos de enxofre reduzido, onde CO₂ e derivados funcionam como única fonte de carbono; - não utilizam materiais orgânicos, mas seu crescimento é suprimido pela presença dos mesmos; - Ao contrário das outras espécies de <i>Thiobacilli</i>, preferem ambientes com pH abaixo de 5;

	<ul style="list-style-type: none"> - Possui tolerância ao ácido e oxida rapidamente o enxofre elementar.
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: (Ilhwan P., Carlito B. T., et al., 2019)

Os ensaios estáticos realizados assumiram a total disponibilidade de neutralizadores e reatividade do enxofre, para a avaliação do potencial de geração de drenagem ácida foram realizados ensaios de laboratório e de campo, dentre eles: determinação do pH em pasta; NAG Test; teste inicial da Bristish Columbia Reserach (B.C. Research Iniatial Test) e teste padrão e teste modificado de Contagem Ácido-Base (ABA/BABM) (DUARTE, 2011).

Quanto aos ensaios cinéticos, contribui com diversos compilados comparando suas efetivas capacidades na avaliação da geração da DAM, cita: colunas de lixiviação; células de umidade e teste de confirmação BCR (DUARTE, 2011).

Segundo Skousen et al (1995) apud Lima (2009), é aconselhada a identificação e quantificação dos minerais presentes na amostra em estudo, através de análises químicas, mineralógicas e petrográficas, bem como a realização dos ensaios estáticos considerando duas ou mais metodologias, como forma de se garantir uma melhor interpretação dos resultados.

Destaca ainda o autor, a influência do intemperismo na formação da DAM, como tempo de exposição, tipo litológico, clima e estrutura. Em regiões de clima tropical como no caso da unidade onde foi feito os estudos, o intemperismo químico é mais intenso. Localidades onde o clima seco é predominante o intemperismo físico é mais intenso (DUARTE, 2011).

De forma criteriosa, e em decorrência dos ensaios de caracterização e realização de aterros experimentais, utilizou-se estratégias para uso de materiais sulfetados em áreas onde não se promoverá a geração ácida devido as baixas taxas de oxigênio dissolvido na água, bem como em cota adequada com o objetivo de evitar eventual contato dos materiais com O₂ e água aerada e também o uso de geomembranas PEAD sobre enrocamentos (DUARTE, 2011).

6.8 Uma Revisão das Estratégias Recentes para Prevenção da Drenagem Ácida de Mina e Reciclagem de Rejeitos de Mina – Japão, 2019

A prevenção não requer tratamento e manutenção contínua e recentemente, estratégias para a gestão de DAM e rejeitos de minas estão ganhando evidência, sendo essas: técnicas de prevenção (Tabela 1111) e reciclagem de resíduos de mineração, por oferecem uma abordagem mais sustentável à gestão da drenagem ácida de mina em comparação com as

estratégias convencionais de remediação (ILHWAN et. al., 2019). Quanto aos métodos de revestimento, cita que outros materiais orgânicos, como dietilenotriamina (DETA), trietilenotetramina (TETA), trietilenotetramina-bisditiocarbamato de sódio (DTC-TETA), carbazóis modificados com resina de metileticetona formaldeído e 8-hidroxiquinolina, demonstraram suprimir a oxidação de sulfetos de ferro. (por exemplo, pirita e pirrotita) através da formação de revestimentos hidrofóbicos.

Tabela 11 - Técnicas recentes para suprimir a formação de DAM

Métodos: Barreira de Oxigênio, utilizada nas coberturas secas e eliminação subaquática		
Materiais Utilizados: Lodo de tratamento DAM, cinzas, argila, resíduos alcalinos industriais, rejeitos com baixo teor de sulfeto, solo/cultivo natural, resíduos de minas não reativos, materiais orgânicos.		
Características:	<ul style="list-style-type: none"> - Colocação de coberturas compostas por materiais de granulação fina, materiais básicos e substrato orgânico sobre os rejeitos reativos da mina; - Submergir os rejeitos da mina debaixo d'água. 	
Resultados:	Positivos:	<ul style="list-style-type: none"> - As coberturas secas e de água suprimiram a formação de DAM limitando a disponibilidade de água e/ou O₂ para os resíduos da mina.
	Negativos:	<ul style="list-style-type: none"> - A cobertura alcalina pode aumentar a solubilidade de alguns metais potencialmente tóxicos e metalóides; - A cobertura orgânica pode causar dissolução redutiva de precipitados de ferro (Fe); - A cobertura hídrica não é aplicável às regiões áridas e semiáridas.
Referências: Bellaloui et al., 1999; Bussière et al., 2004; Bussière et al., 2007; Demers et al., 2008; Demers et al., 2017; Lottermoser, 2003; Moncur et al., 2015; Peppas et al. , 2000; Ribet et al., 1995;		
Métodos: Bactericida		
Materiais Utilizados: Ácido acético, ácido láctico, dodecilsulfato de sódio, dodecilbenzenosulfonato de sódio, laurilsulfato de sódio.		
Características:	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da atividade biológica ou extermínio de bactérias presentes nos rejeitos mineiros. 	

Resultados:	Positivos:	- Os bactericidas inibem eficazmente o crescimento de microrganismos, suprimindo assim a formação de DMRI.
	Negativos:	- Não pode inibir permanentemente a atividade microbiana, portanto é necessária adição repetitiva.
Referências: Evangelou, 1995; Kleinmann, 1982; Kleinmann e Erickson, 1983; Lottermoser, 2003 , Parisi et al., 1994; Zhang e Wang, 2017.		
Métodos: Co-descarte e mistura		
Materiais Utilizados: Pó de forno de cimento, cinzas volantes, resíduos líquidos verdes, cal, calcário, cal mesa, minerais de fosfato, bauxita de lama vermelha, gesso vermelho, escória, espuma de açúcar	Positivos:	- Neutralização da acidez gerada pela oxidação de minerais sulfetados.
	Negativos:	- Rochas naturais e resíduos industriais com alto potencial de neutralização podem ser utilizados para controlar a acidez e as concentrações de metais potencialmente tóxicos na DAM.
Referências: Alakangas e outros, 2013; Doye e Duchesne, 2003; Hakkou e outros, 2009; Lottermoser, 2003; Miller e outros, 2006; Mylona e outros, 2000; Rodríguez-Jordá e outros, 2012; Xenidis e outros, 2002; Yeheyis et al., 2009.	Positivos:	- O equilíbrio entre AP e NP, bem como a mistura homogênea são importantes para maximizar a eficiência.
	Negativos:	- Formação de revestimentos hidrofóbicos em minerais sulfetados.
Métodos: Passivo - Revestimento orgânico		
Materiais Utilizados: EDTA, DTC-TETA, substância húmica, MEKFR, fosfolipídios, oleato de sódio, TETA, 8-hidroxiquinolina.	Positivos:	- Os compostos orgânicos tornam os minerais sulfetados hidrofóbicos, o que inibe as interações água
	Negativos:	- Formação de revestimentos hidrofóbicos em minerais sulfetados.

		mineral.
	Negativos:	<ul style="list-style-type: none"> - A estabilidade a longo prazo destes revestimentos orgânicos, que podem ser degradados por alguns microrganismos, é desconhecida.
<p>Referências: Ačai et al., 2009; Cai et al., 2005; Chen et al., 2006; Elsetinow et al., 2003; Jiang et al., 2000; Kargbo et al., 2004; Lan et al., 2002; Liu et al., 2013; Shu et al., 2013; Ustamehmetoğlu et al., 2013; Zhang et al., 2003a , Zhang et al., 2003b.</p>		
<p>Métodos: Passivo - Microencapsulação</p>		
<p>Materiais Utilizados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Agentes de revestimento: Apatita, cimento, MgO, KMnO₄, manganita, fosfato, metassilicato de sódio; - Oxidantes: H₂O₂, NaClO; - Tampão: acetato de sódio. 		
Características:	Formação de revestimentos inorgânicos como oxi-hidróxido de ferro, fosfato de ferro e hidróxido de ferro/sílica.	
Resultados:	Positivos:	<ul style="list-style-type: none"> - Os revestimentos de oxi-hidróxido de ferro, fosfato de ferro e óxido de ferro/sílica foram eficazes na supressão da formação de DMRI, evitando o contato mineral com oxidantes como O₂ e Fe³⁺.
	Negativos:	<ul style="list-style-type: none"> - O uso excessivo de fosfato pode causar a eutrofização dos corpos d'água; - H₂O₂ é difícil de manusear e armazenar.; - As técnicas não são seletivas.
<p>Referências: Evangelou, 1995; Evangelou, 1996; Fan et al., 2017; Huang e Evangelou, 1992; Huminicki e Rimstdt, 2009; Ji et al., 2012; Pérez-López et al., 2007; Zhang e Evangelou, 1998.</p>		
<p>Métodos: Passivo – Revestimento à base de silano</p>		
<p>Materiais Utilizados: AAPS, APS, MTMOS, NPS, PropS-SH, PropS-SH/SiO₂ , TEOS, TMOS, VTMS</p>		

Características:	Formação de revestimentos compostos por componentes inorgânicos e orgânicos.	
Resultados:	Positivos:	<ul style="list-style-type: none"> - Os revestimentos à base de silano combinam as vantagens dos componentes inorgânicos (isto é, durabilidade e adesão superior) e orgânicos (isto é, flexibilidade, resistência a trincas e compatibilidade). - Não requer nenhuma etapa de pré-oxidação usando H_2O_2.
	Negativos:	Possui pouca seletividade para minerais sulfetados.
Referências: Diao et al., 2013; Khummalai e Boonamnuayvitaya, 2005; Liu et al., 2017; Metroke et al., 2001, Ouyang et al., 2015; Rao et al., 2003; You et al., 2013.		
Métodos: CME (Microencapsulação Transportadora)		
Materiais Utilizados: - Íons metálicos (loid): Al^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} , Si^{4+} e Transportador orgânico: Catecol		
Características:	Formação seletiva de revestimentos de metal (loid) -oxihidróxido em minerais sulfetados	
Resultados:	Positivos:	<ul style="list-style-type: none"> - Os revestimentos à base de silano combinam as vantagens dos componentes inorgânicos (isto é, durabilidade e adesão superior) e orgânicos (isto é, flexibilidade, resistência a trincas e compatibilidade); - Não requer nenhuma etapa de pré-oxidação usando H_2O_2.
	Negativos:	- Possui pouca seletividade para minerais sulfetados.
Referências: Diao et al., 2013; Khummalai e Boonamnuayvitaya, 2005; Liu et al., 2017; Metroke et al., 2001; Ouyang et al., 2015; Rao et al., 2003 , You et al., 2013.		

Fonte: (Ilhwan P., Carlito B.T., et al., 2019)

A atual transição energética que estamos vivendo (solar, eólica e eletrificação veicular, por exemplo) tem impulsionado ainda mais o crescimento de minérios utilizados, e consequentemente, deve haver mudança nos processos de beneficiamento, lavra e gestão de

rejeitos, com tecnologias mais eficientes e com menor impacto ambiental, crescimento da produção mineral com novas pesquisas e novos projetos, melhoria da infraestrutura (portos, ferrovias etc.), e aproveitamento de estéreis e rejeitos (economia circular) e reciclagem mais consolidada (PMB, 2023). Mas ainda sim, na mineração em nível global, o processamento mineral e a metalurgia extractiva geram grandes quantidades de resíduos estimadas em cerca de 20 a 25 bilhões de toneladas/ano em todo o mundo (Lottermoser, 2003). Esses resíduos são normalmente coletados e descartados em grandes barragens de rejeitos ou represamentos de estéril que exigem custos elevados, bem como grandes áreas de terra (Zhang et al., 2011). Alguns destes represamentos causaram vários problemas ambientais, já citados no (GARD Guide, 2009).

Neste sentido, muitos pesquisadores propuseram a utilização ou reciclagem de resíduos de minas como materiais de construção e geopolímeros, bem como aditivos de cimento, contribuindo na reduzir o volume de resíduos de minas e também limitando a formação de DAM. (Ilhwan P., Carlito B.T., et al., 2019).

Tabela 12- Estratégias recentes para reciclar resíduos de minas

Uso:	Materiais de construção de estradas/rodovias
Materiais Utilizados:	Rejeitos de minas de cobre, rejeitos de kimberlito, rejeitos de magnetita, escória siderúrgica
Características:	Substituição de agregados naturais utilizados na construção de estradas e misturas asfálticas por resíduos de minas.
Resultados:	<ul style="list-style-type: none"> - Os resíduos de minas podem ser usados para construção de estradas (por exemplo, sub-base, base e camadas de desgaste); - Ao substituir parte dos agregados por resíduos de minas, melhorou-se o desempenho das misturas asfálticas para construção de estradas.
Referências:	Oluwasola e outros, 2015; Swami e outros, 2007; Wang e outros, 2016.
Uso:	Aditivos de cimento
Materiais Utilizados:	Ganga de carvão, rejeitos de minas de cobre, rejeitos de ouro, rejeitos de ferro, resíduos de minas de tungstênio.
Características:	Substituição de resíduos de minas por alguma parcela de argila/agregados na produção de cimento.

Resultados:	<ul style="list-style-type: none"> - A pirita e os minerais ricos em oxigênio nos resíduos de minas reduziram a temperatura de calcinação para a produção de clínquer de cimento porque suas decomposições liberam calor e oxigênio, respectivamente. - Se adicionado em excesso, as propriedades mecânicas do cimento diminuem.
Referências:	Çelik et al., 2006; Choi et al., 2009; Uvas, 2011; Ma et al., 2016; Onuaguluchi e Eren, 2012; Qui et al., 2011
Uso:	Tijolos de geopolímero
Materiais Utilizados:	Lama de alumínio, cinzas volantes classe F, rejeitos de minas de cobre, rejeitos de minas de ouro
Características:	<p>Mecanismo de geopolimerização:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Dissolução de aluminossilicato usando solução fortemente alcalina para formar ligação simplesoligômeros de Si e/ou Si Al. 2 - Policondensação de espécies oligoméricas para formar material polimérico inorgânico. 3 - Ligação de partículas sólidas não dissolvidas na estrutura geopolimérica final.
Resultados:	<ul style="list-style-type: none"> - Os rejeitos de minas são ricos em Si e Al, materiais essenciais para a geopolimerização. - As faixas de composição de $1 < \text{Si/Al} < 5$ e $\text{Na/Al} \approx 1$ são recomendadas para a fabricação de tijolos de alta qualidade. Caso contrário, dissolve-se facilmente em água e perde a sua integridade mecânica.
Referências:	Ahmari e Zhang, 2012; Ahmari e Zhang, 2013 ^a ; Ahmari e Zhang, 2013b; Duxson et al., 2007; Kiventerä et al., 2016; Ren et al., 2015; Zhang et al., 2011

Fonte: (Ilhwan P., et al., 2019)

6.9 Progresso Recente nas Tendências Tecnológicas de Drenagem Ácida de Mina na África do Sul: Prevenção, Tratamento e Recuperação de Recursos – África do Sul, 2023

Em mais este trabalho do país sul africano, importante base da indústria de mineração, teve como herança ao longo desta trajetória de exploração de insumos minerários de diversas minas abandonadas com enormes rejeitos contendo pirita provenientes de minas de carvão e ouro. A infiltração de água através de pilhas e lagoas de rejeitos contendo sulfuretos, atividades a céu aberto e subterrâneos, resíduos e depósitos de rochas levaram à lixiviação de grandes volumes de metais como zinco, níquel, chumbo, cobre e íons sulfato em riachos e ecossistemas fluviais (Baloyi et al., 2023).

Contaminação de aquíferos, drenagem de minas abandonadas em contato com corpos hídricos superficiais e pântanos afetam o uso agrícola, recreativo e a potabilidade das águas, são alguns exemplos contemporâneos que o país vem buscando solucionar. O estudo enfoca os tratamentos que estão sendo implantados como: osmose reversa, bombeamento de oxigênio na água para acelerar a oxidação de ferro e outros metais potencialmente tóxicos.

Situações desafiadoras levaram o país a desenvolver em fase piloto o método álcali-báρio-cálcio (ABC), que consiste em três fases. A primeira etapa é a adição de cal e sulfeto de cálcio para remover metais e ácidos. A segunda etapa envolve o tratamento da maior parte da água restante com carbonato de báro para remover o sulfato restante como sulfato de báro. O sulfato de báro e alguns resíduos de lodo são reduzidos em um forno a carvão para recuperar alguns dos compostos alcalinos usados para neutralização, bem como báro e cálcio, alguns dos quais podem ser reciclados de volta ao processo de tratamento. (Baloyi et al., 2023).

Há também destaque para a chamada Magnesita – Suavizantes – Osmose Reversa – Eutética (MASRO) Freeze Crystallisation que usa pasta de magnesita para neutralizar a AMD e precipitar hidróxidos metálicos, tecnologia desenvolvida e patenteada pelo Conselho de Pesquisa Científica e Industrial (CSIR) do país.

São desenvolvidos na África do Sul outras tecnologias e revelam o país e suas diversas tentativas de mitigar os efeitos da drenagem ácida de mina em seu território, buscando a recuperação de recursos com práticas mais atuais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria de mineração ao redor do mundo, visando melhor eficiência em suas operações, atua de maneira padronizada conforme ordenamento do Guia GARD, a fim de facilitar seus processos de pesquisas e obter resultados céleres e menos dispendiosos, porém não atendem as práticas mais adequadas para a predição e caracterização das amostras em geral – fundamental para uma boa estratégia de prevenção da DAM - e buscam apenas atender as conformidades quanto às exigências das legislações ambientais pertinentes de cada localidade.

Os estudos apresentadas nesta revisão sistemática, deixam claro que o uso sustentável de recursos provenientes das operações mineiras pode, não somente diminuir os impactos ambientais gerados, como possibilita ganhos financeiros com as diversas possibilidades de utilização econômica destes insumos por meio da economia circular, além de ser notório para a sociedade a magnitude de seus efeitos danosos e a vastidão de pesquisas cuja finalidade é a sustentabilidade.

Opções de remediação e tratamento da drenagem ácida de mina, foram desenvolvidas para reduzir os impactos ambientais negativos nos sistemas ecológicos e na saúde humana, porém são opções mais dispendiosas se comparadas a uma boa caracterização geomorfológica.

A iniciativa como a da África do Sul, que é bastante afetada por problemas relacionados a minas abandonadas, em desenvolver e patentear várias tecnologias para tratamento dos efeitos danosos revela que a comunidade científica vêm buscando alternativas mais representativas em relação a particularidade de cada local, considerando clima, litologia e relevo.

Muitos destes artigos criticam os métodos e práticas atualmente utilizados para caracterizar minas e resíduos de processamento quanto ao seu potencial de DAM, já obsoletas em alguns casos, uma vez que são da década de 1970 e isso têm estimulado pesquisadores do mundo todo, impulsionados por pressões da sociedade e governamentais a promoverem uma série de alternativas visando uma melhor caracterização para predição, gestão e tratamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Adriana Trópia de et al. Avaliação de duas metodologias de ensaios cinéticos para previsão de drenagem ácida de mina em amostras de estéril de mineração de urânio. Rem: Revista Escola de Minas, v. 67, p. 107-113, 2014.

ARANTES, Judson Pereira et al. Caracterização de rejeitos de mineração contendo sulfetos e carbonatos aplicando método XRD Rietveld antes e após testes estáticos.

BALOYI, Jeffrey et al. Progresso recente nas tendências tecnológicas de drenagem ácida de minas na África do Sul: prevenção, tratamento e recuperação de recursos. Água , v. 15, n. 19, pág. 3453, 2023.

BARROS, Claudia Affonso et al. Métodos para tratamento biológico de drenagem ácida de mina-DAM. 2012.

BIELLA, Amanda Casmierchcki et al. Ensaio estáticos e cinéticos para a minimização dos efeitos da drenagem ácida de mina na mineração de carvão com cinzas de fundo de termoelétrica. Revista De Engenharia e Tecnologia, v. 14, n. 3, 2022.

BISSACOT, Leonardo Corrêa Grassi. Caracterização geoquímica de rejeitos de mineração de ouro como contribuição à gestão ambiental e ao projeto de fechamento da mina. 2014.

BORMA, Laura de Simone; SOARES, Paulo Sergio Moreira. Drenagem ácida e gestão de resíduos sólidos de mineração.

CHELIDZE, Tamaz et al. Complexity in Geophysical Time Series of Strain/Fracture at Laboratory and Large Dam Scales. Entropy, v. 25, n. 3, p. 467, 2023.

DOLD, Bernardo. Previsão de drenagem ácida de rochas: uma revisão crítica. Journal of Geochemical Exploration , v. 120-132, 2017.

DUARTE, Marcelo Guimarães. Ensaios laboratoriais para avaliação da drenagem ácida na barragem da UHE Irapé. 2011.

FARFAN, J. R. J.; BARBOSA FILHO, Olavo; SOUZA, Vicente Paulo de. Avaliação do potencial de drenagem ácida de rejeitos da indústria mineral. CETEM, 2004.

FLÔR, Janaina Magalhães. Análise da comunidade de microalgas encontrada em lago ácido de mina de urânio (Caldas-MG): bioprospecção para avaliação de potencial biotecnológico. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GALHARDI, Juliana Aparecida; SOLDERA, Bruna Camargo. Efeitos da drenagem ácida de mina sobre a qualidade das águas subterrâneas: preceitos legais e técnicos. Holos Environment, v. 18, n. 1, p. 87-109, 2018.

GARCÍA-VALERO, A. et al. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material. Journal of Water Process Engineering, v. 33, p. 101064, 2020.

GARD – Global Acid Rock Drainage Guide. Prediction, prevention and management. The international network for acid prevention. Acesso: www.gardguide.com Data de acesso: 03/11/2023

GOBBO, L. A. Aplicação da difração de raios X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland. 2009. 273f. Tese (Doutorado) - Recursos Minerais e Hidrogeologia, USP, São Paulo, 2009

HALLBERG, K. B. New perspectives in acid mine drainage microbiology. *Hidrometallurgy*, v. 104, n. 3-4, p. 448-453, 2010

HOELZEL, Marlon. Interconectividade de aquíferos e os efeitos da drenagem ácida de mina na qualidade das águas da bacia carbonífera de Santa Catarina. 2018. Tese de Doutorado.

HOFFERT, J. Raymund. Acid mine drainage. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 39, n. 5, p. 642-646, 1947.

<https://geoportal.sgb.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=c238ee855a1e440c84e562d269298ac9>

JENKINS, R. Instrumentation. In: Modern Powder Diffraction. Washington, D.C: Mineralogical Society of America, 1989, Cap.2, p.19-43.

LIMA, Ana Luisa Cocco. Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé-Vale do Jequitinhonha-Minas Gerais. 2009.

LOTTERMOSER, BG Indicadores ambientais para drenagem ácida de minas: avanços no conhecimento e desafios futuros. In: Fechamento de Minas 2012: Anais da Sétima Conferência Internacional sobre Fechamento de Minas . Centro Australiano de Geomecânica, 2012. p. 3-12.

MASINDI, Vhahangwele et al. Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. *Ecological engineering*, v. 183, p. 106740, 2022.

MEND PROGRAM - Environment Canada, Investigation of Prediction Techniques for Acid Mine Drainage, Mend, Projects 1.16.1a; 1.16.1b; 1.16.1c, CANMET, 1991

MENDONÇA, R. M. G., Estudo da Difusão de Oxigênio em Materiais de Cobertura. 2007. 390p. Tese (Doutorado) - Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

NEUMANN, Reiner; SCHNEIDER, Claudio Luiz; ALCOVER NETO, Arnaldo. Parte II: Caracterização tecnológica de minérios.

PARK, Ilhwan et al. Uma revisão das estratégias recentes para prevenção da drenagem ácida de minas e reciclagem de rejeitos de minas. *Quimosfera* , v. 219, pág. 588-606, 2019.

PMB 2023 – Panorama Mineração do Brasil 2023.

SANTOS, Letícia Possoli dos. Predição de drenagem ácida de mina em áreas impactadas pela mineração de carvão: estudo de caso: área Santa Augusta e Linha Batista–Criciúma/SC. 2016.

SILVAS, Flávia Paulucci Cianga et al. Caracterização e neutralização de drenagens ácidas de minas provenientes da mineração de carvão em Santa Catarina. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, n. 20, p. 23-32, 2011.

SIMATE, Geoffrey S.; NDLOVU, Sehliselo. Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 2, n. 3, p. 1785-1803, 2014.

SKOUSEN, Jeffrey G.; ZIEMKIEWICZ, Paul F.; MCDONALD, Louis M. Formação, controle e tratamento de drenagem ácida de minas: Abordagens e estratégias. *As Indústrias Extrativas e a Sociedade* , v. 6, n. 1, pág. 241-249, 2019.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. *Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas*, Florianópolis, p. 210-228, 2003.

SOUZA, V. P.; BORMA, L. S.; MENDONÇA, R. M. G. Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez. *Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas*, Florianópolis, p. 210-228, 2003.

SUMMERS, Linda; BONELLI, Julio. *Guia Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas*. Dirección de Asuntos Ambientales. Sub-Sector Minería. Ministerio de Energía y Minas. Lima-Peru, 1995

UDVARDI, Beatrix et al. Effects of particle size on the attenuated total reflection spectrum of minerals. *Applied spectroscopy*, v. 71, n. 6, p. 1157-1168, 2017.

USEPA - U.S. Environmental Protection Agency, Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction. EPA 530-R-94-036, Washington, DC. 1994.