



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



LICIANE ALVERNAZ PENA

**ESTADO DA ARTE: TÉCNICAS INOVADORAS DE ESTABILIZAÇÃO PARA
ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS DA MINERAÇÃO**

DECIV-UFOP

OURO PRETO

2026

Estado da Arte: Técnicas inovadoras de estabilização para estruturas geotécnicas da
mineração

Liciane Alvernaz Pena

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. Ds.c. Ricardo André Fiorotti Peixoto – UFOP

Orientador: Ms.c. Douglas Mol Resende – IFNMG

OURO PRETO

2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Liciane Alvernaz Pena

Estado da arte: Técnicas inovadoras de estabilização para estruturas geotécnicas da mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 26 de fevereiro de 2026

Membros da banca

D.Sc. - Ricardo André Fiorotti Peixoto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Douglas Mol Resende - Orientador - Instituto Federal no Norte de Minas Gerais
D.Sc. - Laís Cristina Barbosa Costa - Universidade Federal do Ceará
M.Sc. - Marialaura Herrera Rosas - Universidade Federal de Ouro Preto

Ricardo André Fiorotti Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Andre Fiorotti Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/03/2026, às 12:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1082024** e o código CRC **ACECD8DC**.

*Dedico aos meus pais que, sob muito sol,
permitiram que eu chegasse até aqui,
na sombra.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço primeiramente por me conceder fé, força e sabedoria ao longo de toda esta caminhada, guiando meus passos e sustentando-me nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais, Rosângela e Renato, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos inúmeros sacrifícios realizados para que eu pudesse chegar até aqui. Tudo o que sou e cada conquista alcançada refletem o cuidado, a dedicação e os valores que sempre me ensinaram.

À minha família, fonte permanente de incentivo, compreensão e apoio, deixo meu sincero agradecimento por ter sido alicerce fundamental em cada etapa dessa trajetória acadêmica.

De modo especial, registro minha gratidão aos professores Ricardo Fiorotti e Douglas, orientadores deste trabalho, pela orientação atenta, pela disponibilidade, pela confiança e pelas valiosas contribuições, essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com destaque para a Escola de Minas, agradeço pelo suporte institucional, pela excelência acadêmica e pela sólida formação proporcionada ao longo do curso.

Estendo meu reconhecimento a todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional, pelos ensinamentos transmitidos, pela dedicação ao conhecimento e pelo incentivo constante à construção do saber.

Ao Grupo de Pesquisa RECICLOS CNPq, que se tornou uma verdadeira família, agradeço pelo acolhimento, pelas trocas de conhecimento, pelo apoio técnico e humano e pelo ambiente de aprendizado que tanto contribuiu para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Por fim, agradeço aos meus amigos e amigas pelo companheirismo, pelo incentivo, pelas palavras de apoio e pela presença constante, que tornaram essa caminhada mais leve, significativa e especial.

RESUMO

Os métodos de estabilização desempenham papel essencial para o aumento da estabilidade e, portanto, da segurança das estruturas de disposição de rejeitos. A ausência ou a aplicação inadequada dessas técnicas pode resultar em acidentes de grandes proporções, como os registrados em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que provocaram perdas humanas incalculáveis e graves impactos ambientais. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar técnicas inovadoras de estabilização aplicadas às estruturas geotécnicas da mineração, com ênfase na estabilização química e mecânica. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica, abordando o beneficiamento do minério, as características das estruturas de disposição de rejeitos, bem como as técnicas de estabilização mais recentes e os métodos de monitoramento. A análise realizada permitiu compreender o propósito e o funcionamento dessas técnicas, além de identificar suas tendências de evolução e limitações. Os resultados reforçam a relevância dessas práticas para a segurança operacional, a mitigação de riscos e a prevenção de acidentes em empreendimentos minerários. Observa-se, ainda, que as técnicas estudadas contribuem para o aprimoramento do comportamento geotécnico dos resíduos de mineração e se alinham aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 11, 12 e 13.

Palavras-chaves: resíduos da mineração; estabilização química; estabilização mecânica, mineração; empilhamento hidráulico desaguado.

ABSTRACT

Stabilization methods play an essential role in increasing the stability and, consequently, the safety of tailings disposal structures. The absence or inadequate application of these techniques may lead to large-scale accidents, such as those recorded in Mariana (2015) and Brumadinho (2019), which caused severe environmental impacts and significant loss of life. In this context, this study aims to present innovative stabilization techniques applied to mining geotechnical structures, with emphasis on chemical and mechanical stabilization. The adopted methodology consisted of a literature review addressing mineral processing, the characteristics of tailings disposal structures, as well as recent stabilization techniques and monitoring methods. The analysis made it possible to understand the purpose and functioning of these techniques, in addition to identifying their development trends and limitations. The results reinforce the relevance of these practices for operational safety, risk mitigation, and accident prevention in mining projects. Furthermore, the studied techniques contribute to improving the geotechnical behavior of mining tailings and are aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs) 9, 11, 12, and 13.

Keywords: mining waste; chemical stabilization; mechanical stabilization; hydraulic dewatered stacking

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de beneficiamento do minério de ferro	14
Figura 2 – Detalhamento do funcionamento do hidrociclone.	15
Figura 3 – Método de alteamento a jusante para barragem de rejeitos	18
Figura 4 – Método de alteamento a montante para barragens de rejeitos	18
Figura 5 – Método de alteamento em linha de centro para barragens de rejeitos	19
Figura 6 – Fluxograma do tipo de pilha por material disposto	20
Figura 7 – Seção de empilhamento drenado contido por enrocamento de estéril de mina	21
Figura 8 – Empilhamento drenado por meio de tubos geotêxteis.....	22
Figura 9 – Seção típica depósito de rejeitos filtrados.....	23
Figura 10 – Fluxograma da recuperação de partículas grossas	24
Figura 11 – Implementação do empilhamento hidráulico desaguado na mina El Soldado no Chile	25
Figura 12 – Deposição realizada ao fim da operação da cava.....	27
Figura 13 – Deposição realizada na cava em operação	27
Figura 14 - Compatibilidade entre técnicas inovadoras e os tipos de estruturas.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos rejeitos de mineração quanto à tensão em campo e ao teor de sólidos.....	16
Tabela 2 – Pontos positivos e negativos das estruturas.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo geral	12
2.2. Objetivo específicos	12
3. METODOLOGIA.....	13
4. REVISÃO DA LITERATURA	14
4.1. Geração de resíduos da mineração	14
4.2. Estruturas geotécnicas da mineração de disposição de resíduos	17
4.2.1. Barragem	17
4.2.2. Pilha.....	20
4.2.2.1. <i>Empilhamento drenado</i>	21
4.2.2.2. <i>Empilhamento seco – Dry stacking</i>	22
4.2.2.3. <i>Empilhamento hidráulico desaguado</i>	24
4.2.3. Cava.....	27
4.3. TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO.....	28
4.3.1. Estabilização Mecânica	28
4.3.2. Estabilização Química	30
4.4. Monitoramento Geotécnico	35
5. ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA E DISCUSSÕES.....	36
5.1. Comparação entre técnicas convencionais e inovadoras.....	36
5.2. Desempenho das estruturas geotécnicas.....	37
5.3. Afinidades entre os tipos de estabilização e as estruturas geotécnicas.....	39
6. CONCLUSÃO.....	41
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade e, ao longo dos anos, desempenhou papel fundamental na formação dos modelos econômicos e sociais (Amarante, 2017). O Brasil figura como uma das grandes potências minerais do mundo, sendo esse setor de grande valia para a economia brasileira por gerar milhares de empregos diretos e indiretos (Junior *et al.*, 2017). Apesar da grande importância da mineração para a sociedade, o setor também gera impactos negativos, sobretudo na geração de resíduos, como estéreis e rejeitos.

Normalmente, os resíduos são estocados em barragens ou pilhas, gerando altos custos na sua gestão (Ramos *et al.*, 2022). O monitoramento ineficaz dessas estruturas pode desencadear fatores de instabilidade e, eventualmente rompimentos, como os registrados nos desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Tais eventos resultam em impactos negativos de ordem socioambiental e econômica, conforme mencionado por Nogueira *et al.* (2024). Diante desse cenário, vêm sendo desenvolvidas técnicas destinadas ao aumento da estabilidade das estruturas.

Essas técnicas incluem a estabilização química e mecânica. A estabilização mecânica, conforme discutida por Borges (2022) e De Oliveira (2024), consiste principalmente na aplicação de energia mecânica no material a ser estabilizado, promovendo sua reorganização e densificação. Por outro lado, o uso de cimento Portland, é uma forma de estabilizar quimicamente os resíduos da mineração (Consoli *et al.*, 2022; Chaves, 2023).

Embora essas técnicas representem avanços significativos para o setor, ainda existem lacunas na literatura quanto à análise comparativa da eficácia, segurança e viabilidade ambiental de técnicas inovadoras em relação às soluções convencionais. Ademais, o tema se insere em um contexto mais amplo de busca por uma mineração sustentável, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No Brasil, a discussão também se relaciona às diretrizes legais estabelecidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Brasil, 2020), que reforça a importância da gestão de riscos e da adoção de alternativas tecnicamente mais seguras.

Diante desse cenário, torna-se necessária o melhor entendimento e a divulgação de técnicas inovadoras de estabilização de estruturas geotécnicas, capazes de promover maior segurança operacional, reduzir riscos ambientais e contribuir para a sustentabilidade do setor

mineral. Assim, o presente trabalho justifica-se pela relevância acadêmica e prática em explorar, avaliar e incentivar a adoção de soluções tecnológicas que se mostrem eficazes para a gestão geotécnica moderna da mineração.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo relacionar e analisar comparativamente as técnicas inovadoras sustentáveis e técnicas convencionais adotadas para a estabilização de estruturas geotécnicas no setor da mineração.

2.2. Objetivo específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Diferenciar e classificar as estruturas geotécnicas da mineração;
- Discutir a afinidade entre as técnicas estabilizadoras inovadoras e as estruturas geotécnicas, comparativamente às técnicas convencionais;
- Analisar a segurança, os impactos ambientais e sociais para aplicação das técnicas de estabilização inovadoras e das técnicas convencionais nas estruturas geotécnicas estudadas.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho adota como metodologia a realização de uma revisão bibliográfica voltada às áreas de materiais de construção e geotecnia, com o objetivo de compreender a geração de resíduos da mineração, as estruturas geotécnicas de contenção, as técnicas de estabilização e os métodos de monitoramento geotécnico.

Inicialmente, foram definidos o tema e os objetivos do estudo. O tema selecionado, “Técnicas inovadoras de estabilização para estruturas geotécnicas da mineração”, orienta a investigação sobre abordagens recentes, inovadoras e mais sustentáveis empregadas na estabilização de estruturas utilizadas no setor mineral.

Para a realização da revisão bibliográfica exploratória, foram feitas buscas nas bases Google Acadêmico e Web of Science, nos idiomas português e inglês, utilizando palavras-chave como “rejeitos”, “estruturas de disposição de rejeitos”, “estabilização química de rejeitos”, “empilhamento hidráulico desaguado” e “estabilização mecânica de rejeitos” entre outras relacionadas ao tema.

A pesquisa caracteriza-se pelo levantamento, seleção e análise de documentos de domínio científico, como livros, teses, dissertações e artigos publicados em periódicos especializados (Cavalcante *et al.*, 2020). Esse tipo de metodologia permite identificar o estado da arte sobre o tema, conhecer as contribuições mais recentes e organizar o conhecimento existente, fornecendo subsídios para o direcionamento de estudos futuros e para a consolidação de práticas mais seguras e eficientes no contexto da mineração.

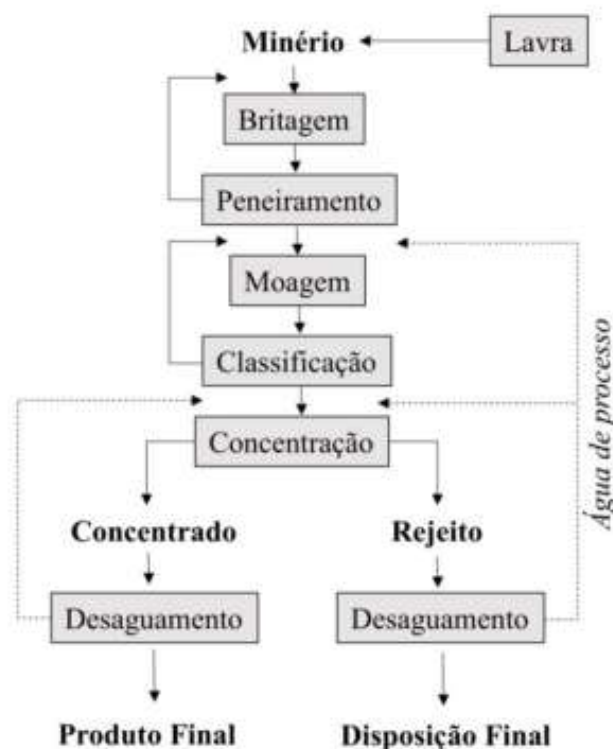
4. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura, abordando os principais conceitos relacionados ao tema deste trabalho. Serão discutidos o processo de geração de resíduos na mineração, as características das estruturas geotécnicas de contenção de rejeitos e estéreis, bem como as principais técnicas inovadoras de estabilização e métodos de monitoramento das estruturas. O objetivo é fornecer uma base teórica que sustente a análise e a discussão dos resultados posteriormente desenvolvidos.

4.1. Geração de resíduos da mineração

A Figura 1 ilustra, de forma esquemática, o processo de tratamento do minério, conforme apresentado por Wagner (2025). Após a lavra, o estéril é geralmente disposto em pilhas de estéril, enquanto o minério segue para as etapas de britagem e moagem. O objetivo da britagem é reduzir os fragmentos de rocha a um tamanho adequado para alimentação em equipamentos de moagem. A britagem é feita em etapas, seguida da moagem, que ao passá-los por moinhos produz uma redução ainda maior no tamanho dos fragmentos (Neto, 2024).

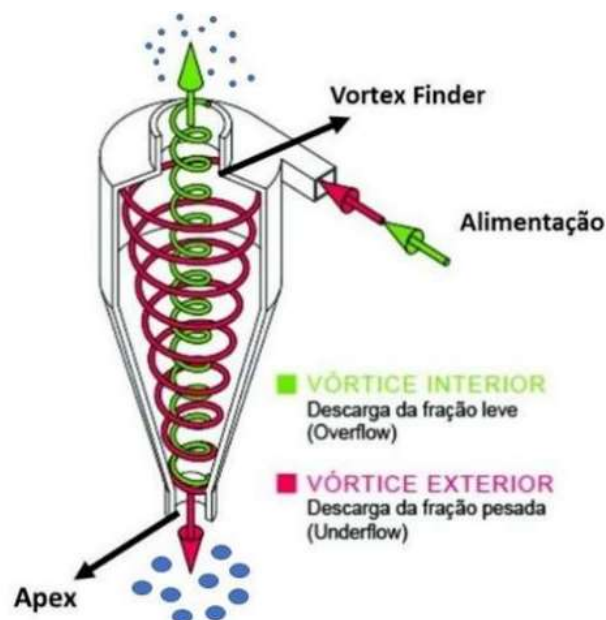
Figura 1 – Processo de beneficiamento do minério de ferro



Fonte: Wagner, 2025.

As operações unitárias que envolvem classificação e peneiramento objetivam a separação do material em frações de tamanhos distintos, gerando produtos ou adequando sua granulção e porcentagem de sólidos às etapas posteriores (Almeida, 2020). Conforme a Figura 2, a classificação de rejeitos é feita através da hidrociclonação (ou ciclonação) de rejeitos sendo normalmente utilizada para produzir areia grossa empregada na construção de barragens (Wayhs, 2024). O *underflow* do hidrociclone que constitui a parte mais grossa e densa do material é encaminhado para o peneiramento e o *undersize* da peneira (material retido nas telas) é encaminhado para a fase de concentração (Neto, 2024). Já o *overflow* (rejeito fino ou ultrafino) é removido sendo dispostos em barramentos (Martinatto *et al.*, 2024).

Figura 2 – Detalhamento do funcionamento do hidrociclone.



Fonte: AKW, 2018 apud Soeiro, 2024.

A etapa de concentração que remove a maior parte das impurezas presentes no minério por meio de métodos concentração gravítica, magnética, eletrostática, flotação, floculação seletiva (Luz *et al.*, 2018). Após a fase de concentração tem-se então o material concentrado que, após fases de espessamento, filtragem e secagem, vai gerar o produto econômico final, a ser disponibilizado para a metalurgia (Neto, 2024).

Já o desaguamento do rejeito (espessamento) é seguido de recuperação de água para o processo (Luz *et al.*, 2018). O material espessado é, por fim, direcionado para a sua disposição em barragens. No caso de disposição em pilhas, ainda há uma fase de filtração deste rejeito, a fim de se retirar o máximo de água (Neto, 2024).

Como visto anteriormente, o beneficiamento do minério gera resíduos, os quais são classificados em dois tipos principais: estéril e rejeito (Thomé, 2017). Os estéreis são materiais sólidos gerados durante a atividade de lavra que, devido às suas características mineralógicas e à ausência de valor econômico, são destinados ao armazenamento temporário ou à disposição em estruturas apropriadas (Gontijo, 2021; Ferreira, 2025). Por sua vez, o rejeito é resultante do processo de beneficiamento do minério, ou seja, é o material residual após a separação do mineral durante o processo industrial (Ferreira, 2025).

De acordo com Rodrigues (2017), os rejeitos podem ser liberados com diferentes níveis de saturação dependendo dos processos utilizados no beneficiamento do mineral. Na Tabela 1, Ulrich (2019) classifica os 4 tipos de rejeitos referente a tensão de campo e a taxa de sólidos. Isso tem como princípio determinar a mudança entre os comportamentos do rejeito de acordo com a umidade presente (Souza, 2020).

Tabela 1 – Classificação dos rejeitos de mineração quanto à tensão em campo e ao teor de sólidos

Classificação dos rejeitos	Tensão em campo (Pa)	Teor de sólidos (%)
Rejeito em polpa	< 5 até 70	< 50
Rejeito espessado	20 até 100	50 até 70
Rejeito em pasta	100 até 800	70 até 85
Rejeito filtrado	> 800	> 85

Fonte: Adaptado da Ulrich, 2019.

É importante destacar, também, a granulometria do rejeito. Os fatores que influenciam o tamanho dos grãos dos rejeitos se devem às características da rocha de origem e as diferenças na intensidade e na duração dos processos de cominuição, o que depende do tamanho de liberação dos minerais de valor. A obtenção de concentrados mais puros requer maior grau de moagem, com conseqüente aumento no gasto energético e na produção de partículas muito finas e de difícil separação, as quais normalmente são removidas antes do processo de concentração ou são perdidas nos rejeitos (Wagner, 2025). Os rejeitos podem ser classificados quanto à granulometria em finos (lama), quando apresentam partículas menores que 0,075 mm, e granulares, quando apresentam partículas superiores a esse valor (IBRAM, 2016).

4.2. Estruturas geotécnicas da mineração de disposição de resíduos

De acordo com o CREA-MG (2025), normalmente, estéril e rejeitos são depositados em pilhas e em barragens, respectivamente, e exigem manejo adequado e monitoramento constante, a fim de garantir a estabilidade e a segurança de tais estruturas. Outra maneira de dispô-los, menos comum, é em cavas exauridas de minas a céu aberto. A disposição é o ato ou processo de destinar/depositar o resíduo em um local apropriado.

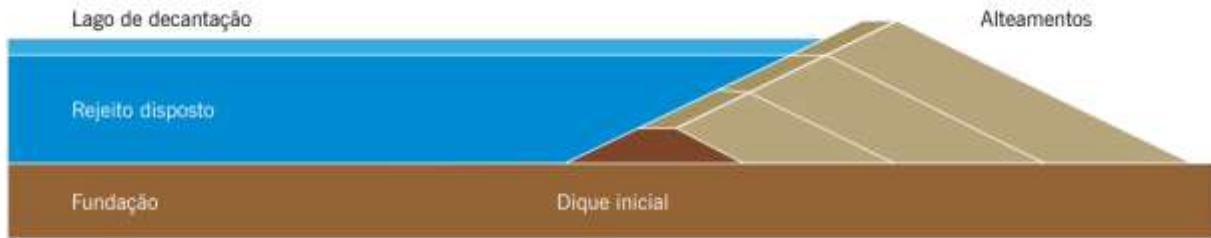
4.2.1. Barragem

Segundo a Lei nº 14.066 (Brasil, 2020), que atualiza a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a definição para barragem consiste qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas. As barragens podem assumir distintas finalidades conforme o contexto em que estão inseridas, abrangendo usos como irrigação, abastecimento de água, geração de energia hidrelétrica e contenção de resíduos, entre outros.

No Brasil o monitoramento e a segurança são realizados com auxílio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) que é uma ferramenta desenvolvida pela Agência Nacional de Mineração (ANM) e que opera em conformidade com a PNSB (Queiroz *et al.*, 2024). Conforme o ANM (2026), o país tem 909 barragens cadastradas, das quais 470 estão inseridas no Plano Nacional de Segurança de Barragens.

As barragens podem ser construídas utilizando-se solos, estéreis e o próprio rejeito (Souza, 2018). O alteamento pode levar décadas, dependendo do volume de rejeitos produzidos e do espaço disponível no reservatório (Sandroni *et al.*, 2023). Grande parte das estruturas de barragens de rejeitos enquadra-se em três tipos principais de alteamento: montante, jusante e linha de centro (Queiroz *et al.*, 2024). As Figura 3 e Figura 5 apresentam os tipos principais de alteamento.

Figura 3 – Método de alteamento a jusante para barragem de rejeitos



Fonte: IBRAM, 2016.

A Figura 3 demonstra esquematicamente o alteamento a jusante. Conforme Sandroni *et al.* (2023), a barragem é alteada sobre base sólida e com materiais compactados. Além disso, nesse método é utilizado somente o rejeito *underflow* que é lançado no talude de jusante sobre compactação e controle construtivo (Queiroz *et al.*, 2024). O rejeito *underflow* compõe o rejeito granular, de granulometria mais grossa e com pouca quantidade de água (Martinatto *et al.*, 2024). Contudo, esse método necessita de maiores volumes de material para construção, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material (IBRAM, 2016).

Figura 4 – Método de alteamento a montante para barragens de rejeitos



Fonte: IBRAM, 2016.

O método a montante apresentado na Figura 4, no qual a estrutura do barramento é iniciada a partir de uma barragem piloto por meio de um dique de partida, geralmente de material argiloso ou compacto (Machado, 2007). Apesar dos benefícios financeiros e a rapidez para construção, a estrutura apresenta a menor segurança, sobretudo devido à capacidade de liquefação da massa de rejeitos saturada em virtude da proximidade da linha freática ao talude de jusante (Thomé, 2018).

Em fevereiro de 2019, como medida regulatória cautelar, a Agência Nacional de Mineração (ANM) estabeleceu, por meio da Resolução nº 4, prazos para a completa remoção de barragens construídas com rejeitos e que tivessem sido alteadas pelo método denominado “a

montante” (Azevedo, F. D.; De Azevedo, R. F.; França, R. V. M, 2020). Posteriormente, em 2020, entrou em vigor a Lei nº 14.066 (Brasil, 2020), que proibiu, em âmbito nacional, a construção e o alteamento de barragens de mineração por esse método. Como resultado dessas medidas, a descaracterização das barragens a montante segue em curso, com 144 estruturas ainda em processo no país, conforme dados do ANM (2026).

Figura 5 – Método de alteamento em linha de centro para barragens de rejeitos



Fonte: IBRAM, 2016.

O alteamento da crista do método linha de centro ilustrado na Figura 5 é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida (Queiroz *et al.*, 2024). Esse tipo de estrutura apresenta custo intermediário e o nível de risco semelhantes com as barragens a montante (Sandroni *et al.*, 2023). Neste método (Figura 5) e no de jusante (Figura 5), é possível implantar um sistema interno de drenagem, o qual inicia no dique de partida, constituído de uma parte vertical e outra horizontal (Bestel *et al.*, 2020).

O rejeito em polpa (teor de sólidos < 50%) geralmente é disposto em barragens alteadas jusante e linha de centro (Souza, 2020). Entretanto, esse material torna-se bastante suscetível a fenômenos de liquefação (Ferreira, 2018).

Cardozo *et al.* (2017) mostra o resumo das vantagens e desvantagens dos principais tipos dos métodos de alteamentos:

- Montante: destaca-se pelo menor custo e pela possibilidade de aplicação em áreas com restrição de espaço. Entretanto, apresenta baixa segurança estrutural, além de elevada suscetibilidade à liquefação e à ocorrência de *piping*;
- Jusante: reconhecido por proporcionar maior segurança. Contudo, esse método demanda grande quantidade de material de construção, além de sistemas de proteção do talude a jusante;

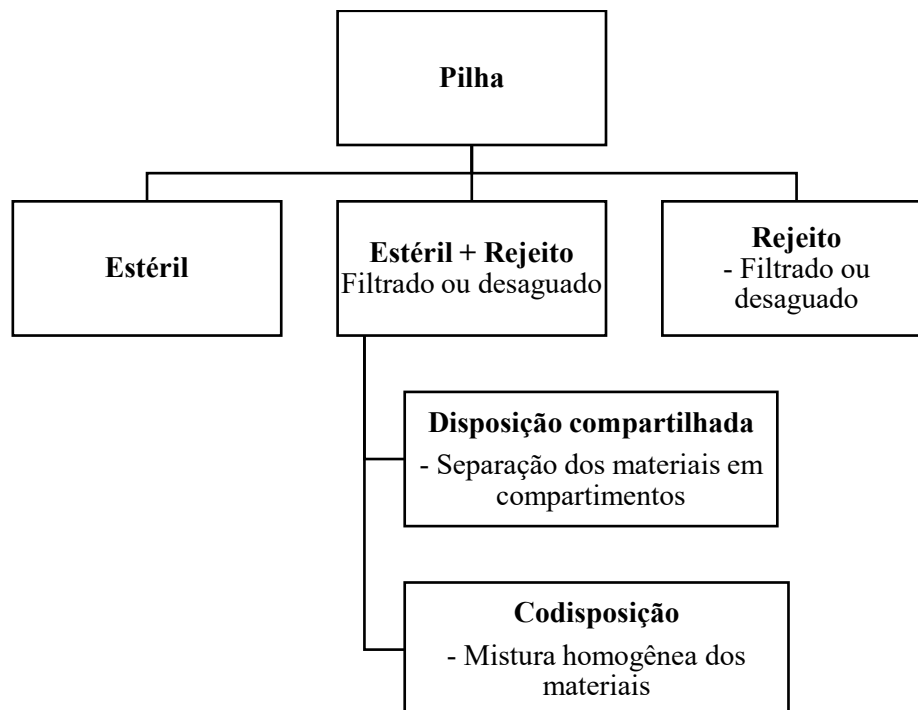
- Linha de centro: apresenta como principal vantagem a flexibilidade construtiva. No entanto, sua aplicação requer a implantação de um sistema de drenagem eficiente.

4.2.2. Pilha

Devido aos acidentes ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), tornou-se necessária a revisão da legislação referente às barragens. Nesse contexto, as empresas passaram a adotar modelos de gestão de resíduos mais seguros e sustentáveis (CREA-MG, 2025). Entre as alternativas que se destacam, estão os empilhamentos de rejeitos, estéril ou a junção dos resíduos.

Vale destacar, que tanto as pilhas de estéril quanto as de rejeito podem atingir dimensões consideráveis, dependendo do volume de material produzido e da área disponível para armazenamento (CREA-MG, 2025). A Figura 6 apresenta o fluxograma dos tipos de pilhas elaborado por MPMG (2024).

Figura 6 – Fluxograma do tipo de pilha por material disposto



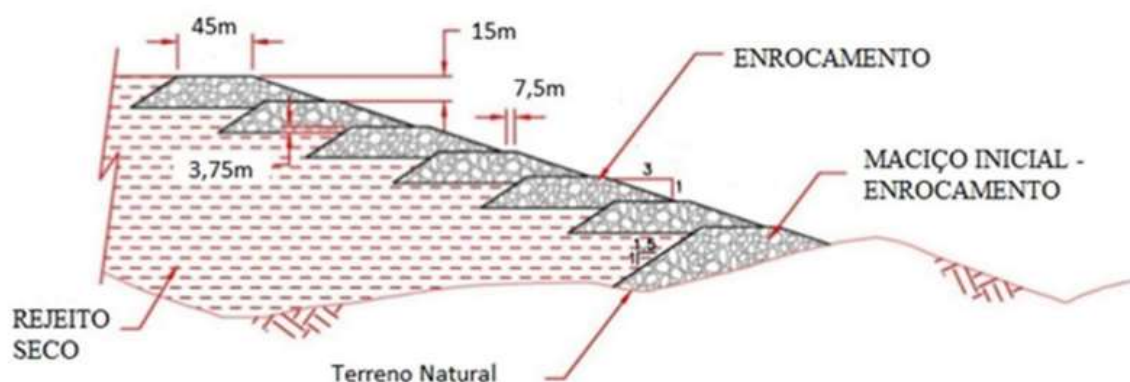
Fonte: Adaptado da MPMG, 2024.

O empilhamento de rejeitos pode ser classificado, de forma geral, em empilhamento drenado e empilhamento a seco (*dry stacking*). Mais recentemente, destaca-se o desenvolvimento da técnica de empilhamento hidráulico desaguado

4.2.2.1. Empilhamento drenado

Neste método é adotada uma estrutura drenante, que não retém a água livre que sai dos poros dos rejeitos (IBRAM, 2016). O processo da formação desses empilhamentos é semelhante aos alteamentos à montante de barragens, estando a diferença na granulometria dos materiais envolvidos (Moreira, 2021). Primeiramente, é construído um dique de partida e o sistema de drenagem interna, logo após, ocorre o lançamento dos rejeitos arenosos pela técnica de aterro hidráulico na crista do dique de partida (Alves, 2015). Conforme a Figura 7, é possível observar uma seção de empilhamento drenado.

Figura 7 – Seção de empilhamento drenado contido por enrocamento de estéril de mina



Fonte: Rosemont Copper Company 2019, apud Pedrosa *et al.*, 2020.

Esse método apresenta como vantagens a obtenção de maciço não saturado com maior estabilidade, comparativamente às barragens, menor potencial de danos provenientes de rupturas catastróficas e melhores condições para fechamento com menor custo de reabilitação ambiental (Paixão, 2019). Como desvantagem pode ser citada a necessidade de maior controle e alto custo operacional (Moreira, 2021), além disso, a disposição exige restrição do tipo de rejeito a usar, sendo característico de rejeitos arenosos (Alves, 2015).

O empilhamento drenado pode ser realizado também a partir de tubos geotêxteis para disposição de resíduos, conforme a Figura 8. Nos trabalhos de Silva (2017) e Morais (2020), apresenta como alternativa no desaguamento, confinamento e empilhamento de rejeito de ouro. O uso de tubos possibilita a drenagem da fase líquida e a retenção dos sólidos, com uma considerável redução do teor de umidade e consequente redução de volume, já que essa drenagem também proporciona uma acomodação dos sólidos dentro do tubo (Fernandes *et al.*,

2016). No experimento de Silva (2017), demonstrou que nas primeiras 24 horas após o enchimento dos tubos geotêxteis, o teor de sólidos é de 75% e em 21 dias o valor aumenta para 80%.

Figura 8 – Empilhamento drenado por meio de tubos geotêxteis



Fonte: Wilke *et al.*, 2015 apud Morais, 2020.

4.2.2.2. *Empilhamento seco – Dry stacking*

Conforme Alves (2020), o empilhamento a seco é a alternativa mais segura e sustentável, principalmente se comparada ao método convencional de disposição de rejeitos. Esse método, denominado também como *dry stacking*, é um método que consiste em empilhar o rejeito após a separação do sólido da água, através de um sistema de filtragem (Ferreira, 2022). Campos (2023) destaca que essa etapa envolve desafios operacionais que impactam diretamente a redução do volume de material a ser depositado, a prevenção do represamento de polpas e a eficiência da recirculação de água no processo de beneficiamento, dentre os quais destacam-se:

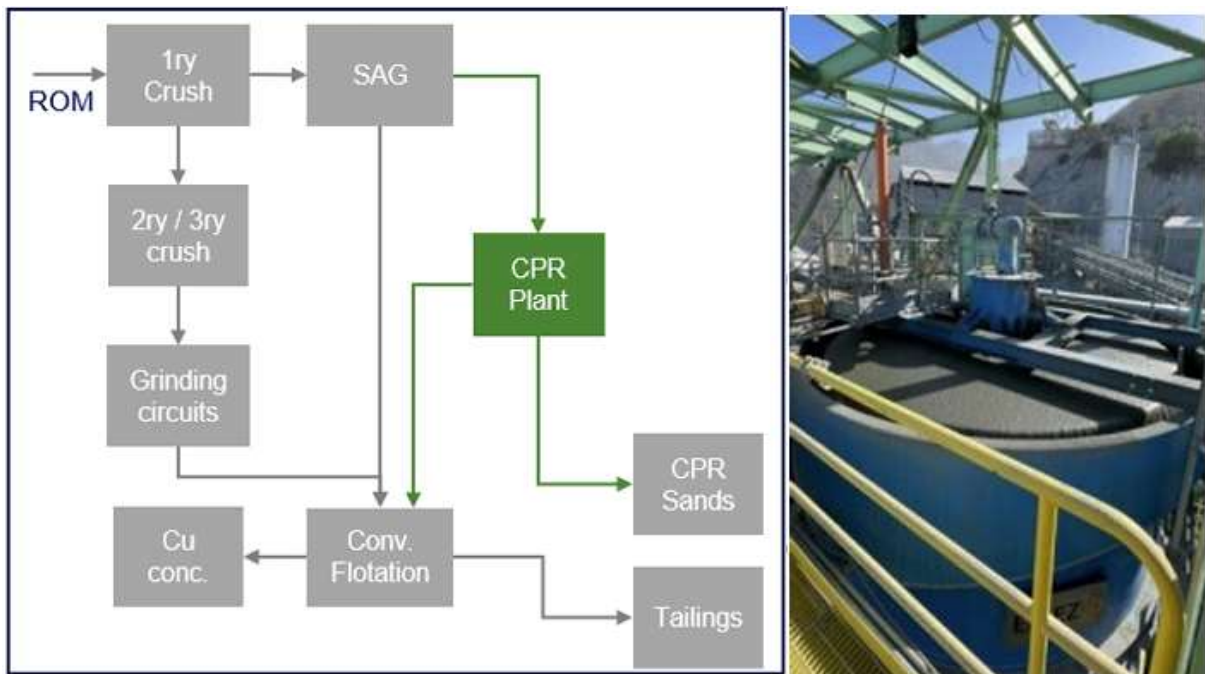
- A facilidade de entupimento dos filtros pelas partículas finas;

4.2.2.3. Empilhamento hidráulico desaguado

O empilhamento hidráulico desaguado foi desenvolvido pela Anglo American como uma alternativa para o gerenciamento de rejeitos. O sistema baseia-se na co-disposição planejada de rejeitos arenosos isentos de finos e rejeitos úmidos, formando um arranjo drenante tridimensional capaz de promover a drenagem *in situ* dos materiais e acelerar sua consolidação (Bustamante *et al.*, 2024). O objetivo central é construir canais de drenagem com a fração arenosa, permitindo que a água dos vazios escoe rapidamente por gravidade até um ponto de coleta (Newman *et al.*, 2023).

Dessa forma, uma alternativa que vem ganhando destaque é a técnica de flotação de partículas grossas de rejeito para a produção de areias conhecida como *Coarse Particle Recovery* (CPR). De acordo com a Figura 10, a tecnologia CPR passou a ser integrada ao circuito de moagem, gerando rejeitos arenosos, o que reduz o consumo de energia nos moinhos de bolas e aumenta a capacidade do circuito de flotação (Bustamante *et al.*, 2024). O teor de finos das areias CPR é inferior a 5% passante na peneira de 75 μm (Bruton *et al.*, 2023), o que influencia na alta permeabilidade (Newman *et al.*, 2023).

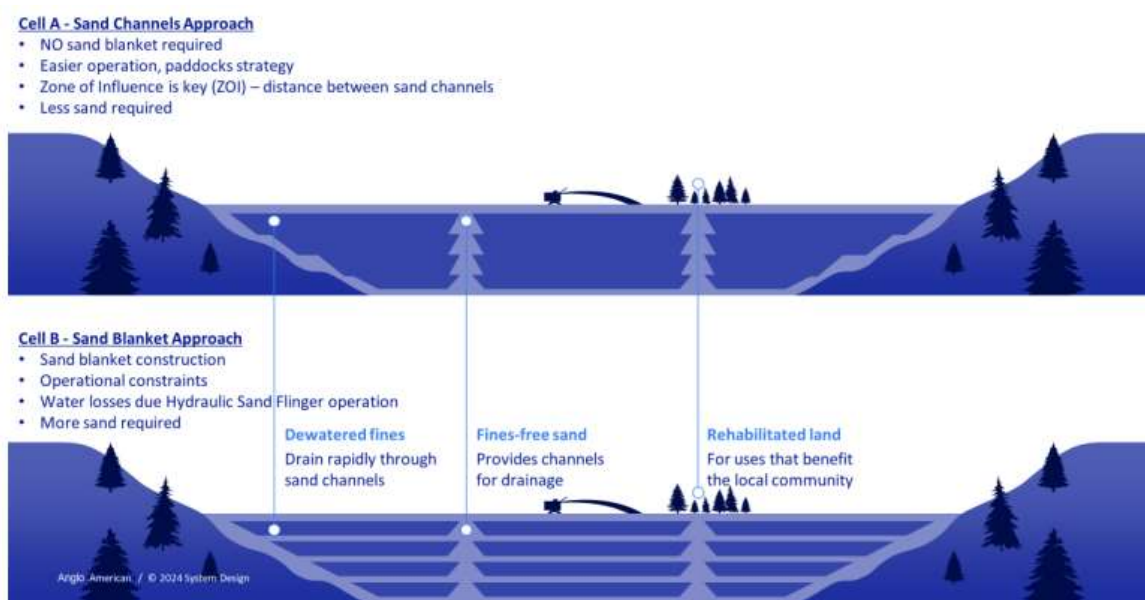
Figura 10 – Fluxograma da recuperação de partículas grossas



Fonte: Bruton *et al.*, 2023.

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** ilustra a primeira aplicação da tecnologia empilhamento hidráulico desaguado na mina El Soldado no Chile para uma barragem em dois cenários.

Figura 11 – Implementação do empilhamento hidráulico desaguado na mina El Soldado no Chile



Fonte: Newman *et al.*, 2024.

No cenário A, o desempenho da drenagem dependerá da distância entre os canais (Mcgregor *et al.*, 2023). Os rejeitos próximos aos canais de areia consolidam mais rápido do que o rejeito afastado (Bruton *et al.*, 2023). Para Mcgregor *et al.* (2023), compreender até que distância os canais de drenagem afetam a dessaturação e o comportamento hidráulico dos rejeitos é essencial para otimizar o uso da areia e garantir a eficiência da técnica.

Já a célula B dispõe de uma operação mais complexa (Bruton *et al.*, 2023). Alguns pontos são abordados no trabalho de Newman *et al.* (2024) entre eles: a dificuldade de obter uma camada uniforme, maior consumo de areia; operações maiores há necessidade de equipamentos transitando sobre o rejeito e a perda de água por evaporação.

Além das aplicações realizadas na mina El Soldado (Chile), pesquisas recentes têm investigado a viabilidade de aplicação em outros contextos geotécnicos incluindo depósitos de rejeito na África do Sul. Essas pesquisas avaliam desde a implementação do empilhamento em uma barragem convencional até a análises operacionais em larga escala, como apresentado por Mcgregor *et al.* (2023) e Nxumalo *et al.* (2024).

No estudo de McGregor *et al.* (2023), avaliou-se a instalação sobre a barragem BW1 ativa, localizado em uma mina na África do Sul com baixa produção de areia CPR. Assim, optou-se pela utilização de areia importada, com espaçamento mínimo de 40 m entre canais. O objetivo principal é eliminar a presença de água superficial nas barragens de rejeitos, permitindo que a água da chuva ou de processo percole rapidamente para dentro dos canais de drenagem, em vez de formar lagos sobrenadantes.

Segundo McGregor *et al.* (2023), as vantagens do método empilhamento hidráulico desaguado:

- Melhora a drenagem e a consolidação de rejeitos (acesso mais rápido a praia de rejeitos, recuperação mais rápida durante a fase de fechamento);
- Melhora a segurança das instalações de armazenamento de rejeito, pois reduz a água dos poros (aumenta a estabilidade geotécnica);
- Menor potencial de perda de resistência devido maiores níveis de consolidação e obtenção de material não saturado (aumenta da resistência a liquefação);
- Redução do risco de *piping* (menor gradiente hidráulico na barragem);
- Melhor recuperação de água (maior volume recuperado com redução dos sólidos em suspensão);
- Custo reduzido em comparação as tecnologias de filtração para projetos semelhantes.

A pesquisa de Nxumalo *et al.* (2024) complementa o estudo desenvolvido por McGregor *et al.* (2023), aprofundando as possibilidades, restrições e riscos identificados para a implementação em escala total da metodologia na barragem BW2 na África do Sul. Conforme o autor, o empilhamento hidráulico desaguado representa uma mudança significativa nas estratégias de recuperação de água, permitindo a recuperação tanto da água superficial quanto da água intersticial. Esse processo reduz os níveis de saturação e favorece a dissipação de pressões neutras, resultando em menor suscetibilidade à liquefação e em maior estabilidade geotécnica do maciço.

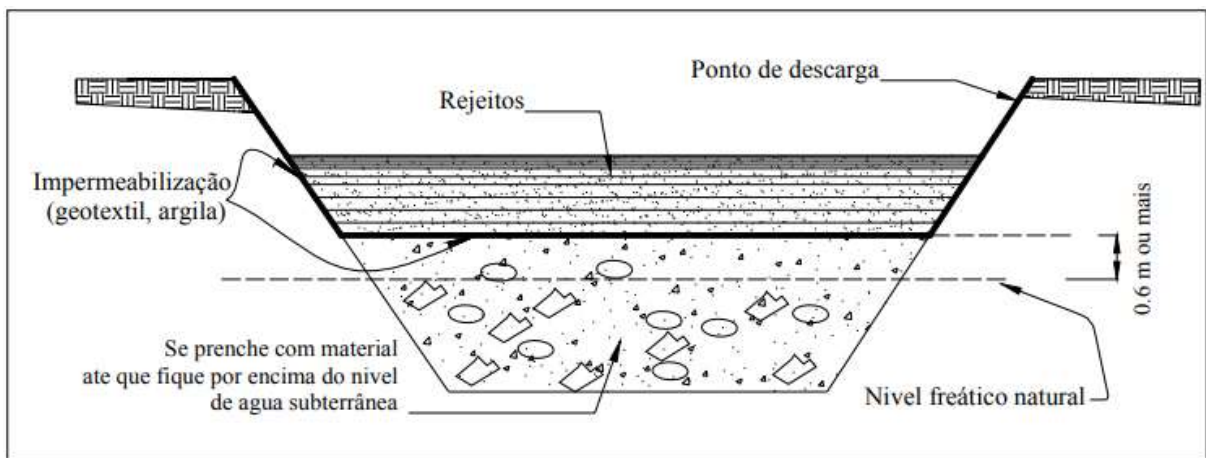
Dessa forma, a tecnologia representa um avanço significativo na gestão de rejeitos, ao ampliar a eficiência na recuperação de água, promover a rápida consolidação do material depositado e a redução de custos. Esse desempenho contribui diretamente para a redução da

saturação, o aumento da resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, para a melhoria das condições de estabilidade das estruturas de disposição.

4.2.3. Cava

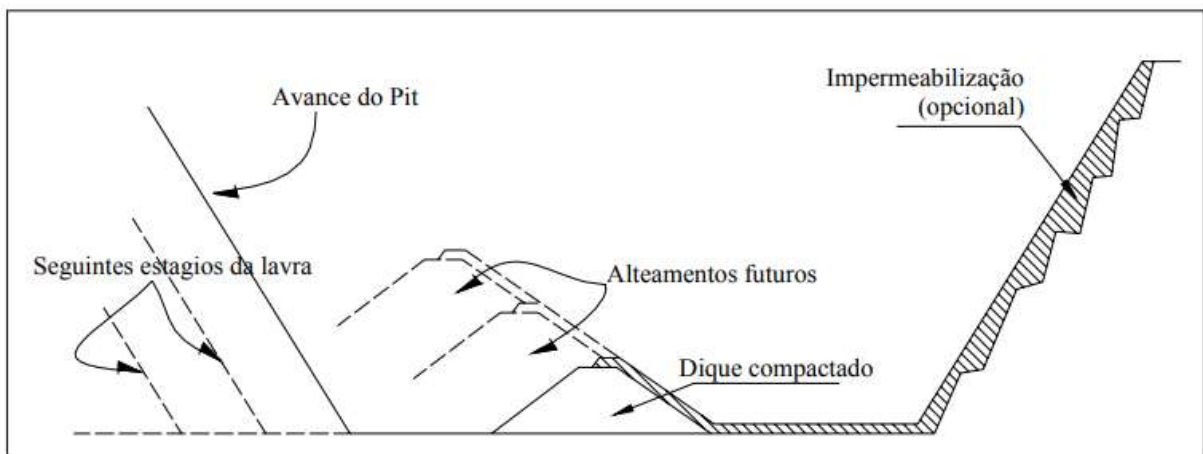
O armazenamento de rejeitos e estéril podem ser realizados em cavas a céu aberto, também conhecido como disposição pit e em cavas subterrâneas. As Figura 12 e Figura 13 apresentam os dois tipos de disposição em cavas a céu aberto.

Figura 12 – Disposição realizada ao fim da operação da cava



Fonte: Lozano, 2006.

Figura 13 – Disposição realizada na cava em operação



Fonte: Lozano, 2006.

Os rejeitos na disposição subterrânea podem ser bombeados diretamente na cava da mina, ou pode-se retirar água para melhorar suas características de deposição (Lozano, 2006). Para Alvarenga (2023) é um método ideal para mineradoras que possuem uma cava e necessitam recuperar a área degradada. Porém, esta técnica possui desvantagens como a

percolação e estabilidades de líquido que causam riscos de contaminação da água ao redor da cava.

Enquanto a disposição a céu aberto, consiste em um método muito atrativo, uma vez que a abertura da cava pode ser preenchida de forma muito mais econômica do que em outros métodos de disposição de rejeitos em superfície (Souza, 2018). Ainda, se a rocha de encaixe do minério não for o suficiente impermeável, é necessário a impermeabilização (geomembrana ou argilas) nos taludes do *pit* (Lozano, 2006).

4.3. TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO

Na literatura, são frequentemente descritas técnicas de estabilização mecânica e química aplicadas a rejeitos. Essas abordagens têm como objetivo melhorar o comportamento geotécnico de materiais que apresentam condições inadequadas para o uso em projetos de engenharia, especialmente aqueles caracterizados por baixa capacidade de suporte, elevada compressibilidade ou reduzida resistência mecânica (Machado, 2022).

4.3.1. Estabilização Mecânica

O método de estabilização mecânica é realizado essencialmente pela aplicação de energia de compactação, com o objetivo de maximizar a quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, aumentando a massa específica aparente seca do solo. Como consequência, ocorre a redução dos vazios e da permeabilidade e o aumento da resistência do solo compactado, fatores fundamentais para a estanqueidade e a estabilidade (Diemer *et al.*, 2008).

A umidade no processo de compactação dos solos influencia diretamente na obtenção de densidades máximas para determinado tipo de solo (Bastos, 2013). Portanto, para energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima, ou uma densidade seca máxima (Pinto, 2006).

Quando se compacta com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma redução dos vazios. O incremento de umidade provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto (Pinto, 2006). Para umidades maiores, no ramo úmido, a compactação orienta as partículas, alinhando-as paralelamente, em uma estrutura denominada dispersa (Vasconcelos, 2021).

A literatura apresenta estudos voltados para a viabilidade de compactação com equipamentos de grande porte como rolo compactador liso e trator de esteiras no processo de disposição de rejeitos de minério de ferro filtrados na forma de pilha (Borges, 2022; De Oliveira, 2024). Além disso, os autores consideraram os custos operacionais, a produtividade e a uniformidade dos resultados para ambos os métodos. De acordo com De Oliveira (2024), o rolo compactador liso consegue atingir compactações em rejeitos filtrados mais elevadas em comparação ao trator. As principais razões que justificam essa maior eficiência são descritas a seguir:

- Aplicação de maior pressão pontual: isso faz com que o solo ou rejeito compactado sob o rolo seja pressionado com mais força por unidade de área, resultando em uma densificação maior do material;
- Compactação dinâmica com vibração: ajuda a reorganizar as partículas do solo ou rejeito, permitindo que elas se aproximem mais umas das outras, eliminando vazios no material e, assim, aumentando a densidade;
- Maior eficácia em materiais granulares: tendem a se reorganizar de forma mais eficiente sob vibração, atingindo maiores densidades;
- Efeitos de impacto repetitivo: com múltiplas passadas, o rolo consegue alcançar um nível de compactação muito elevado, superando o trator em termos de densidade;
- Concentração de peso em um ponto menor: cria uma maior pressão em pontos localizados, levando a uma maior compactação;
- Melhor controle sobre a profundidade da compactação: consegue compactar camadas mais espessas de solo ou rejeito em uma única passada, resultando em uma maior densificação em profundidade, especialmente em solos granulares;
- Flexibilidade no ajuste de frequência e amplitude: permite uma otimização da compactação para diferentes materiais, maximizando a densidade alcançada;
- Mais passadas com menor custo de tempo: devido à sua maior eficiência em compactar camadas mais espessas com vibração, pode atingir uma compactação alta com menos passadas em comparação ao trator, que geralmente requer múltiplas passagens sobre a mesma área para atingir um nível aceitável de compactação.

De modo geral, a compactação mecânica aplicada aos rejeitos filtrados tem se mostrado uma alternativa técnica promissora para o aumento da resistência, redução da permeabilidade e

melhoria da estabilidade global das estruturas de disposição. Contudo, vale salientar que na literatura técnica ainda é carente de informações da verificação da viabilidade geotécnica aplicada à disposição de rejeitos filtrados na forma de pilha, tornando-se necessário o avanço de estudos (Borges, 2022).

4.3.2. Estabilização Química

A estabilização química de solos ocorre por meio do uso de aglomerantes, destacando-se o cimento e a cal como os materiais mais utilizados. Segundo Bevilaqua (2025), a adição de cimentos convencionais tem se mostrado uma solução eficiente para melhorar a resistência mecânica dos rejeitos e reduzir o risco de falhas estruturais.

Ferreira (2022) avaliou a influência da adição de cimento Portland no empilhamento de rejeitos de barragem de minério de ferro, utilizando materiais com teores de sólidos-água de 40% (granulometria arenosa) e 70% (granulometria fina). Os protótipos de pilhas tratados com 1% de cimento, em relação à massa de sólidos, apresentaram capacidade de suportar tensões de empilhamento de 9,33 kPa. As tensões de ruptura total foram de 192,20 kPa para o rejeito de granulometria arenosa e de 28,80 kPa para o rejeito de granulometria fina, evidenciando a influência da granulometria no comportamento mecânico do material. O rejeito mais arenoso, por apresentar maior permeabilidade, favoreceu a dissipação de água, enquanto a incorporação de cimento consumiu parte da água disponível nas reações de hidratação, resultando em menores teores de umidade dos protótipos.

Consoli *et al.* (2022) analisaram o comportamento do empilhamento de misturas de rejeitos de minério filtrados estabilizadas com cimento Portland. Foram avaliadas matrizes constituídas apenas por rejeito e com adição de 3% de cimento, submetidas a ensaios triaxiais. Os resultados indicaram que a incorporação de 3% de cimento reduziu o potencial de liquefação de pilhas compactadas de rejeitos de minério de ferro filtrados. Esse comportamento foi atribuído à geração de pressões neutras negativas durante o cisalhamento não drenado, mesmo sob baixos níveis de tensão, bem como ao aumento expressivo da coesão máxima, que atingiu valores da ordem de 80,9 kPa.

Consoli *et al.* (2023) estudaram a estabilização de rejeitos de ouro em barragens de rejeitos a montante para o descomissionamento, a partir de ensaios de compressão triaxial isotropicamente consolidada e não drenada. Os resultados indicaram que a adição de 12 kg/m³

de cimento Portland foi suficiente para evitar a ocorrência de liquefação. Verificou-se ainda que a utilização de teores mais elevados de cimento (75 e 150 kg/m³), além de impedir a liquefação estática, promoveu o desenvolvimento de um pico de coesão elevado e efetivo, resultando em melhoria significativa do comportamento mecânico da mistura. A razão de atrito no estado crítico apresentou valores de 1,41 para o teor de 12 kg/m³ e de 2,36 para os teores de 75 e 150 kg/m³. A presença do cimento Portland favoreceu a ligação entre as partículas, enrijecendo a estrutura dos rejeitos auríferos e, em deformações mais elevadas, promovendo inclusive a geração de pressões neutras negativas, o que contribui para a mitigação da suscetibilidade à liquefação.

Wayhs (2024) investigaram o comportamento mecânico de misturas de rejeito de minério de cobre (RMC) estabilizadas com cimento Portland CP V-ARI, avaliando a influência do teor de cimento (1%, 3% e 5%) e da energia de compactação (baixa, normal e modificada) em rejeitos coletados em diferentes posições de deposição de uma barragem de rejeitos, denominados P300 (praia superior) e P1500 (praia inferior), aos sete dias de cura. Os ensaios de resistência à compressão simples demonstraram que o aumento do teor de cimento resultou em elevação progressiva da resistência mecânica das misturas, com valores de 0,40 MPa, 1,22 MPa e 3,10 MPa para o rejeito P300, e de 0,47 MPa, 1,31 MPa e 3,10 MPa para o rejeito P1500, correspondentes aos teores de 1%, 3% e 5%, respectivamente. Esse comportamento foi associado à redução da porosidade da mistura compactada, promovida pela maior quantidade de ligante, o que contribuiu para o ganho de resistência dos materiais analisados.

Ghimire *et al.* (2025) avaliaram o desempenho de rejeitos de minério de cobre, na condição natural e estabilizados com cimento, sob condições hidrotérmico-mecânicas. Foram investigados teores de cimento de 4%, 8% e 12%, em relação à massa de rejeito, com corpos de prova curados por aproximadamente sete dias. Os resultados dos ensaios de congelamento–descongelamento com 12 ciclos indicaram que as amostras com 8% e 12% de cimento apresentaram menor liberação de umidade e menor deformação volumétrica, ambas da ordem de 0,2%. Esse comportamento está associado à incorporação do cimento, que promove reações de hidratação responsáveis pelo aumento da estabilidade volumétrica do material.

Entretanto, o consumo de cimento está diretamente associado ao aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na indústria cimenteira. Do ponto de vista ambiental, a produção de cimento Portland convencional é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais

de CO₂, tornando necessária a busca por alternativas mais sustentáveis para a estabilização desses materiais (Bevilaqua, 2025).

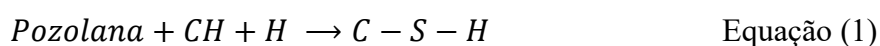
Diante desse cenário, além de soluções que reduzam a emissão de CO₂ nas próprias fábricas de cimento, é fundamental o desenvolvimento de materiais que apresentem propriedades cimentícias semelhantes às dos ligantes convencionais (Oliveira, 2022). Para Carvalho *et al.* (2023), a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma estratégia essencial para a indústria aumentar a ecoeficiência dos compósitos à base de cimento. Nesse contexto, Cotta (2025) desenvolveu um cimento de baixo carbono com incorporação de escória de aciaria, evidenciando o potencial desse resíduo industrial como alternativa sustentável na produção de ligantes.

Os materiais cimentícios suplementares são originalmente gerados como resíduos ou subprodutos industriais (Hossain *et al.*, 2018) e apresentam, de modo geral, propriedades cimentantes ou pozolânicas (Costa, 2021). Entre os materiais frequentemente utilizados para estabilização química de rejeitos da mineração destacam-se a escória de alto forno, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cal de carbureto, cinza de casca de arroz, cal de casca de ovo, cinza volante e metacaulim (Bevilaqua, 2025).

Segundo Mehta (2008), a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica. Essa combinação resulta em três aspectos principais definidas pelo autor:

- A reação é lenta; assim, as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também são lentas;
- A reação consome hidróxido de cálcio, em vez de produzi-lo, o que tem um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos;
- Os produtos da reação são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e impermeabilidade do sistema.

A Pozolana+CH+H → C – S – H Equação (1 apresenta os reagentes na formação do produto silicato de cálcio hidratado.



Cotta (2025), propôs o desenvolvimento e aplicação de um cimento de baixo carbono (CBC), obtido a partir de escórias de aciaria para a estabilização de rejeitos desaguados de

mineração. Conforme a autora a composição E80C20 (80% de escória e 20% de cimento) reduziu em 26% a intensidade de cimento aos 90 dias, implicando em redução das emissões de CO₂ e custos associados. Vale destacar, que a escória contribuiu para uma maior densificação da matriz, promovida pela continuidade das reações de hidratação no tempo e melhoramento do empacotamento.

No trabalho de Matias (2022), investigou-se a influência da aplicação de um compósito estabilizador (CE), constituído por *powder* de escória de aciaria, linear alquil benzeno sulfonato de sódio (LAS), cloreto de sódio e cimento Portland, sobre o comportamento reológico de rejeitos de minério de ferro em barragens. O estudo contemplou adições de CE de 0,75%, 1,5%, 3%, 6%, 12%, 24% e 48%, em relação à massa de sólidos dos rejeitos, avaliadas em intervalos de tempo de 2h, 6h, 24h, 48h, 96h e 144h. Observou-se que, após 2h, o teor de 6% de CE apresentou ganho expressivo de viscosidade, da ordem de 22 mil mPa·s. Esse comportamento é atribuído ao equilíbrio entre as maiores quantidades de cimento Portland e LAS, o que potencializa o efeito de nucleação do *powder* de escória, promovendo a aceleração das reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, maior estruturação da matriz.

Filho *et al.* (2025) estudaram o desempenho de um cimento de baixo carbono, contendo escória de aciaria em sua composição, aplicado à estabilização de pilhas de rejeitos de minério de ferro. Os autores verificaram que a substituição de 40% do cimento convencional por escória de aciaria resultou em aumento da estabilidade dos protótipos avaliados, alcançando resistências de 411,88 kPa e 392,27 kPa. Embora a hidratação da escória do tipo BOF tenha originado silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (C-S-H e C-A-H) em menores proporções quando comparada ao cimento Portland, esses produtos contribuíram para o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo. Além disso, a adição da escória favoreceu o processo de empilhamento dos rejeitos, refletindo em melhoria da estabilidade estrutural das pilhas.

Bruschi (2020) e Santos (2021) avaliaram a estabilização de rejeitos de mineração por meio de cimento álcali-ativado à base de cal de carbureto (CC) e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), ativados com NaOH. A viabilidade do processo foi comprovada por ensaios mecânicos. Destacou-se a matriz com 70% de CBCA e 30% de CC, concentração molar de 1 M e teor de álcalis de 3,86%, que apresentou resistências da ordem de 2,3 MPa aos 7 dias e 4,7 MPa aos 28 dias de cura, para peso específico seco próximo de 15 kN/m³. O desempenho

observado é atribuído à continuidade das reações pozolânicas, associadas à disponibilidade de hidróxido de cálcio e alumino-silicatos no sistema.

Os ligantes ativados por álcali são resultantes da reação química entre um precursor sólido, geralmente constituído por materiais ricos em alumino-silicatos, e um ativador alcalino, que pode estar no estado líquido ou sólido (Costa, 2020). Esse tipo de ligante tem se destacado como alternativa aos aglomerantes convencionais, principalmente devido ao seu potencial de redução de impactos ambientais.

De acordo com Elói (2020), os materiais alcalinamente ativados podem ser classificados em dois grandes grupos. O primeiro grupo é composto por precursores ricos em cálcio, silicatos e aluminatos, tais como as escórias de alto-forno, que necessitam de condições alcalinas relativamente baixas para que o processo de ativação ocorra. O segundo grupo engloba precursores pobres em cálcio, como o metacaulim, as cinzas volantes do tipo F e o rejeito de barragens de minério de ferro. Nesses casos, são requeridas condições de ativação mais severas, como maior concentração do ativador alcalino e temperaturas de cura mais elevadas, a fim de promover o início das reações químicas.

Oliveira *et al.* (2024) estudaram a aplicação de um polímero em um rejeito com teor de umidade de 22%. Os compósitos foram produzidos com 20% de cinzas vulcânicas e 80% de poliacrilato de sódio. As amostras com 1% de polímero apresentaram umidade ótima de 28% e massa específica seca de 1,91 kN/m³, enquanto o rejeito puro apresentou 15,5% de umidade e 2,065 kN/m³. Esse resultado está relacionado à absorção de água pelos hidrogéis formados pelo polímero, que retêm água durante a hidratação e, posteriormente, a liberam ao rejeito no processo de dessorção, deixando vazios na estrutura do material e reduzindo a densidade seca. Foi possível identificar que esse material tem potencial para melhorar as propriedades mecânicas do rejeito e agir como solidificante nos processos de filtração da lama de rejeitos, pois tem a capacidade de absorção de umidade.

Hoch *et al.* (2025) investigaram o comportamento mecânico e microestrutural de rejeitos de ouro estabilizados com um ligante ativado por álcali, composto por cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cal de casca de ovo hidratada e hidróxido de sódio. A adição do ligante resultou em aumento do ângulo de atrito efetivo de pico e da resistência ao cisalhamento, conforme observado nas amostras ativadas por álcali ($\phi'_{\text{pico}} = 61,6^\circ$, $c' = 29,7$ kPa), em comparação às amostras não estabilizadas ($\phi'_{\text{pico}} = 35,7^\circ$, $c' = 0$ kPa). Esse comportamento é

atribuído à formação de ligações interparticulares induzidas pelos produtos de reação do ligante, que aumentam o atrito máximo mobilizado e introduzem um intercepto de coesão no material.

Portanto, observa-se que a estabilização química dos rejeitos proporciona melhorias nos parâmetros de resistência, promovendo um comportamento mecânico mais estável. Esses avanços refletem diretamente na segurança e na confiabilidade das estruturas geotécnicas que utilizam tais materiais, evidenciando o potencial dessa técnica como alternativa eficaz para a disposição e o reaproveitamento de rejeitos da mineração.

4.4. Monitoramento Geotécnico

Vale salientar que, para garantir a segurança e a eficiência das estruturas de contenção de rejeitos e estéril, é fundamental a implantação de um sistema adequado de instrumentação e monitoramento. A resistência do solo está relacionada, entre outros fatores, ao seu grau de saturação, assim como o possível fluxo de água entre seus poros, altera as tensões dentro do solo e sua resistência (Sandroni, 2023). Por essa razão, o acompanhamento contínuo de seu comportamento torna-se indispensável para a detecção precoce de anomalias e para a tomada de decisões mais assertivas ao longo da operação.

A supervisão das estruturas de contenção é realizada por meio de uma variedade de métodos e instrumentos especializados como: inspeções visuais regulares, levantamentos topográficos e instrumentação geotécnica (Basílio, 2024). Entre os diversos métodos de monitoramento utilizados, a instrumentação geotécnica tem uma grande relevância, consiste na instalação de dispositivos e sensores no maciço para medir grandezas como pressão, tensão, deformação, deslocamento, entre outras (Queiroz, 2024).

Os instrumentos podem ser medidores de deslocamento (horizontais e verticais), piezômetros, inclinômetros e marcos topográficos, que possibilitam o conhecimento dos dados em alerta (Moura, 2018). De acordo com França (2023), todo instrumento em um empreendimento deve ser selecionado e instalado para atender a objetivos específicos. Antes de indicar os métodos de medição, é preciso saber as questões geotécnicas que provavelmente surgirão durante as fases de projeto, construção e operação (França, 2023).

5. ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA E DISCUSSÕES

5.1. Comparação entre técnicas convencionais e inovadoras

Nas técnicas convencionais, o rejeito é disposto predominantemente na forma de polpa, mantendo elevado grau de saturação. A estabilidade dessas estruturas depende do adequado funcionamento dos sistemas de drenagem interna, responsáveis pela dissipação da poropressão. Caso ocorra colmatação dos filtros, ou seja, o entupimento do meio poroso por carreamento de materiais finos, pode haver aumento significativo da pressão neutra, reduzindo a tensão efetiva e elevando a suscetibilidade à liquefação e *piping*.

Em contraste, nas técnicas inovadoras o nível de saturação é reduzido por meio da estabilização química, na qual parte da água é consumida nas reações de hidratação. Esse controle do teor de umidade contribui diretamente para o aumento da tensão efetiva e para a redução da poropressão, resultando em menor probabilidade de falhas. Do ponto de vista ambiental e operacional, esse tipo de estabilização com materiais alternativos contribui na redução da emissão do dióxido de carbono.

Comparativamente, verifica-se que as técnicas convencionais apresentam menor custo inicial e simplicidade construtiva, porém maior dependência de sistemas de drenagem e maior vulnerabilidade em cenários de falha operacional. Já as técnicas inovadoras tendem a oferecer maior previsibilidade geotécnica e alinhamento com princípios de sustentabilidade, embora impliquem maior complexidade técnica.

As técnicas inovadoras são alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis como:

- **ODS 9 - Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação:** contribuem para o fortalecimento de uma infraestrutura mais resiliente no setor mineral, ao incorporar soluções tecnológicas que favorecem processos produtivos mais limpos e ambientalmente responsáveis, estimulando a inovação e a industrialização sustentável;
- **ODS 11 - Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis:** a adoção de técnicas de estabilização geotécnica mais eficientes aumenta

a previsibilidade do comportamento das estruturas de disposição de rejeitos, contribuindo para a redução de riscos associados à instabilidade. Dessa forma, amplia-se a segurança das comunidades circunvizinhas, além de favorecer a proteção do patrimônio cultural, ambiental e econômico;

- **ODS 12 - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis:** a implementação dessas práticas pelas empresas do setor mineral favorece o manejo ambientalmente adequado dos rejeitos ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esse processo contribui para a minimização de impactos ambientais e sociais, alinhando as atividades produtivas a princípios de produção mais responsáveis;
- **ODS 13 - Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos:** O uso de materiais alternativos em processos de estabilização química pode integrar estratégias voltadas à redução das emissões associadas à produção de insumos convencionais (Cimento Portland), contribuindo, ainda que indiretamente, para a mitigação de gases de efeito estufa no setor da mineração.

Dessa forma, a escolha da técnica mais adequada deve considerar não apenas aspectos econômicos imediatos, mas também segurança de longo prazo, características do rejeito e impactos ambientais e sociais associados.

5.2. Desempenho das estruturas geotécnicas

Com base nos estudos, verifica-se que o grau de saturação constitui um dos principais fatores de instabilidade em estruturas geotécnicas de mineração, uma vez que o aumento da poropressão reduz a tensão efetiva e, conseqüentemente, a resistência do material, podendo desencadear fenômenos como a liquefação. Nesse contexto, estruturas convencionais que armazenam resíduos com menor teor de sólidos, como barragens, são suscetíveis a modos de falhas quando comparadas a sistemas de empilhamento e cavas exauridas. A Tabela 2 apresenta resumidamente os pontos positivos e negativos das estruturas pesquisadas.

Tabela 2 – Pontos positivos e negativos das estruturas

Estrutura	Positivos	Negativos
Barragem	Baixo investimento	Aumento saturação
Pilhas	Redução saturação	Alto investimento
Cavas exauridas	Reaproveitamento de áreas degradadas	Condicionamento da cava

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

Entre os métodos de alteamento, o método a jusante é reconhecido como mais seguro que o método a montante e linha de centro, pois o alteamento ocorre sobre material previamente compactado, reduzindo a incerteza associada à consolidação dos rejeitos. Ainda assim, permanece dependente do controle hidráulico e da manutenção da drenagem interna da estrutura.

Por outro lado, os sistemas de empilhamento, apresentam menores níveis de saturação, menor geração de poropressão e, conseqüentemente, menor suscetibilidade à liquefação estática. Comparativamente às barragens convencionais, as pilhas tendem a apresentar maior estabilidade.

Entretanto, observa-se que o empilhamento filtrado (*dry stacking*) desaguado implica custos iniciais mais elevados, devido à necessidade de separação sólido-líquido. Já o empilhamento drenado apresenta maior custo na fase operacional. Ainda assim, ao longo do ciclo de vida da estrutura, a redução de riscos geotécnicos e de custos associados ao fechamento e à mitigação de impactos pode compensar o investimento.

O empilhamento hidráulico desaguado apresenta elevada compatibilidade com sistemas de disposição convencional. Ao permitir a retirada do material logo após o beneficiamento e promover drenagem estruturada por meio de canais ou mantas de areia — em analogia ao conceito de filtro proposto por Terzaghi — o método reduz o grau de saturação e aumenta a tensão efetiva do rejeito. Comparativamente às barragens convencionais de armazenamento hidráulico, o empilhamento hidráulico desaguado favorece consolidação mais rápida, menor geração de poropressão e maior controle da migração de partículas finas. Contudo, sua implementação exige planejamento hidráulico, controle operacional contínuo e investimento inicial mais elevado.

O uso de cavas exauridas configura alternativa intermediária, apresentando vantagens ambientais e econômicas ao reaproveitar áreas já degradadas, reduzindo a necessidade de novas intervenções territoriais. Contudo, sua aplicabilidade depende das condições geomecânicas da cava, da estabilidade dos taludes e do controle hidrogeológico local.

Dessa forma, observa-se que sistemas com menor grau de saturação apresentam desempenho superior em termos de segurança geotécnica. Entretanto, a escolha da técnica mais

adequada deve considerar características dos rejeitos, viabilidade econômica e contexto operacional da mina.

5.3. Afinidades entre os tipos de estabilização e as estruturas geotécnicas

A afinidade entre técnicas estabilizadoras inovadoras e estruturas geotécnicas está diretamente relacionada às características físicas dos rejeitos e ao tipo de disposição adotado. Diferentemente das técnicas convencionais, que em geral operam com rejeitos em condição saturada — como nas barragens tradicionais — as técnicas inovadoras buscam modificar o estado físico do material, reduzindo o grau de saturação e aumentando a tensão efetiva, o que impacta diretamente na estabilidade da estrutura. Conforme as pesquisas realizadas, a compatibilidade entre as técnicas e as estruturas de disposição é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Compatibilidade entre técnicas inovadoras e os tipos de estruturas

Estabilização mecânica	Estabilização química
<ul style="list-style-type: none"> • Pilhas 	<ul style="list-style-type: none"> • Pilha • Barragem

Fonte: Elaborada pelo autor, 2026.

A estabilização mecânica apresenta maior compatibilidade com estruturas de empilhamento. Como depende da aplicação de energia de compactação, sua eficiência está associada à possibilidade do controle da umidade no teor ótimo. Os rejeitos com comportamento mais arenoso demonstram melhor desempenho, pois permitem maior expulsão de água e maior densificação. Comparativamente às barragens convencionais, onde o material permanece predominantemente saturado e a compactação não é o principal mecanismo de estabilidade, a estabilização mecânica oferece maior previsibilidade geotécnica. Contudo, sua aplicação é limitada em rejeitos ultrafinos ou altamente plásticos, que apresentam dificuldade de drenagem e retenção elevada de umidade.

A estabilização química, por sua vez, apresenta maior versatilidade estrutural, podendo ser aplicada tanto em pilhas quanto como reforço complementar em estruturas convencionais. O uso de cimento Portland, cimento de baixo carbono e ligantes alternativos promove aumento do ângulo de atrito efetivo e da coesão, além de reduzir parcialmente o teor de umidade por meio das reações de hidratação. Essa técnica demonstra maior afinidade com rejeitos de granulometria fina, cuja menor permeabilidade favorece o desenvolvimento das reações

cimentícias. Em comparação às técnicas convencionais, que dependem do comportamento natural do material depositado, a estabilização química modifica intencionalmente os parâmetros de resistência. Entretanto, a aplicação de cimento Portland implica custos adicionais e demanda controle ambiental quanto à produção e utilização, o que deve ser considerado na análise de viabilidade.

De forma comparativa, observa-se que as técnicas inovadoras apresentam maior afinidade com estruturas que operam em regime parcialmente saturado ou drenado, como pilhas compactadas e sistemas de empilhamento. Já as técnicas convencionais mostram-se mais associadas a cenários de menor investimento inicial, porém com maior dependência do controle hidráulico e maior vulnerabilidade à liquefação em condições adversas. Assim, a escolha da técnica deve ser condicionada às características do rejeito, às condições climáticas, à disponibilidade hídrica e à viabilidade econômica do empreendimento.

Em síntese, as técnicas estabilizadoras inovadoras tendem a oferecer maior controle geotécnico e alinhamento com princípios de sustentabilidade quando comparadas às abordagens convencionais, embora demandem maior conhecimento técnico e estudo para escolha da aplicação mais viável.

6. CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho permitiu relacionar e analisar comparativamente as técnicas de estabilização convencionais e inovadoras aplicadas as estruturas geotécnicas da mineração. A metodologia adotada possibilitou identificar os principais tipos de estabilização empregados atualmente, bem como suas contribuições para a melhoria do comportamento dos rejeitos.

A análise comparativa evidenciou que as técnicas inovadoras apresentam avanços significativos quanto à redução do grau de saturação, aumento da resistência dos rejeitos e melhoria da gestão hídrica, refletindo em ganhos ambientais e sociais quando comparadas às técnicas convencionais. Entretanto, observou-se que a aplicabilidade de cada método depende das condições geotécnicas, operacionais e econômicas específicas de cada empreendimento.

Constatou-se ainda que, as técnicas de estabilização devem ser acompanhadas por instrumentação adequada, capaz de monitorar a evolução das estruturas ao longo do tempo. Essa necessidade reforça a crescente conscientização sobre a importância de garantir segurança operacional e eficiência geotécnica na indústria da mineração.

Como limitação, destaca-se a ausência de análises de campo e de estudos quantitativos de desempenho, decorrente do caráter exclusivamente bibliográfico da pesquisa. Apesar disso, o estudo contribui ao sistematizar os métodos contemporâneos de estabilização, evidenciando tendências tecnológicas e seus benefícios na gestão de rejeitos.

Dessa forma, conclui-se que o fortalecimento das técnicas de estabilização, aliado ao monitoramento contínuo das estruturas, constitui um caminho fundamental para a redução de riscos, promovendo uma mineração mais segura, sustentável e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 9, 11, 12 e 13.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em complemento aos estudos avaliados neste trabalho, recomenda-se que pesquisas futuras abordem:

- Estudos de viabilidade operacional da implantação do empilhamento hidráulico desaguado em minas brasileiras, incluindo análises socioambientais e econômicas;
- Avaliações do desempenho das técnicas de estabilização de rejeitos em ambientes com diferentes níveis de sismicidade, contemplando análises numéricas e experimentais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Dashboard de segurança de Barragens de Mineração. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/dashboards/4a9d32d667b14b5ba23f66b3ecc88a65>. Acesso em: 18 fev. 2026. Base de dados.

Amarante, J. L. Histórico da mineração: curso de introdução à mineração para as embaixadas brasileiras. Ministério de Minas e Energia, 2017. 32 slides, color. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/aula-2-historico-da-mineracao.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

Almeida, R. M. Desempenho de uma peneira desaguadora no beneficiamento de minério de ferro. 2020. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5503/13/MONOGRAFIA_DesempenhoPeneiraDesaguadora.pdf. Acesso em: 27 dez. 2025.

Alvarenga, P. S. Disposição de rejeitos de mineração: uma revisão. 2023. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

Alves, H. O. Estudo comparativo de duas técnicas de lavra em barragem de rejeito sob o ponto de vista geotécnico. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

Alves, P. I. A. Empilhamento de rejeito filtrado - a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

Azevedo, F. D.; De Azevedo, R. F.; França, R. V. M. Estudo conceitual de rebaixamento do reservatório de uma barragem de mineração para fins de descaracterização. *In*: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, 2020.

Basílio, S. C. Revisão dos principais instrumentos utilizados para monitoramento de obras geotécnicas de mineração. 2024. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/6856/5/MONOGRAFIA_Revis%c3%a3oInstrumenta%c3%a7%c3%a3oGeot%c3%a9cnica.pdf: 16 dez. 2025.

Bastos, L. A. de C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

Bevilaqua, D. Estabilização de rejeito de minério de ferro tratado com ativação alcalina pelo método one-part. 2025. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

Borges, R. dos P. Análise experimental de um aterro de rejeito arenoso compactado para fins de disposição em pilha. 2022. 92 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Diário Oficial da União: seção

1, Brasília, DF, ano 158, n. 189, p. 11, 30 set. 2020. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2025.

Bruschi, G. J. Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto. 2020. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Bruton, M. S.; Newman, P. Hydraulic Dewatered Stacking: facilitating faster and value-accretive closure of tailings facilities. *In: Mine Closure 2023: Proceedings of the 16th International Conference on Mine Closure*, Australian Centre for Geomechanics, 2023. DOI: https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2315_067. Disponível em: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2315_067_Bruton/. Acesso em: 26 nov. 2025.

Bustamante, N. *et al.* Hydraulic Dewatered Stacking (HDS): Effects of fines content in the drainage performance of the sands. *In: 10th International Conference on Tailings Management*. 2024. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/our-stories/innovation-and-technology/hds-effects-of-fines-content-in-the-drainage-performance-of-the-sands.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2025.

Campos, D. P. Alternativas para aprimorar a capacidade de produção da filtragem de rejeito fino e lamas para empilhamento a seco, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023.

Cardozo, F. A. C.; Pimenta, M.M.; Zingano, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração - uma revisão. *Holos*, v. 8, p. 77-85, 2017. DOI: 10.15628/holos.2016.5367. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367>. Acesso em: 18 nov. 2025.

Carvalho, R. C. *et al.* Performance of low-energy steel slag powders as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 392, p. 131888–131888, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131888>.

Cavalcante, L. T. C.; Oliveira, A. A. S. (2020). Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. *Psicologia em Revista*, 2020. DOI: 10.5752/P.1678-9563.2020v26n1p82-100. Disponível em: https://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S167711682020000100006. Acesso em: 2 nov. 2025.

Chaves, L. R. C. Empilhamento de Rejeito: Retroanálise de uma Pilha Experimental. 2023. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

Consoli, N. C. *et al.* Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: New Brazilian Trend for Tailings Disposal by Stacking. *Applied Sciences*, v. 12, n. 2, p. 836, 14 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12020836>.

Consoli, N. C.; Tomasi, L. F.; Marques, S. F. V. Cement-enhancing mechanical behavior of tailings behind upstream tailings dam for safe decommissioning. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, p. 04023253, 2023. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004741.

Costa, L. M. Influência da pozolanicidade na ativação alcalina. 2020. 139 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia na Construção Civi) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

Costa, J. M. Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto. 2021. Dissertação (Mestrado em Tecnologia na Construção Civi) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Cotta, J. F. Cimento de baixo carbono aplicado na estabilização de pilhas de rejeitos desaguados de mineração. 2025. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

CREA-MG. Nota técnica: Padrão glocal e pilhas de estéril. Disponível em: <https://www.crea-mg.org.br/sites/default/files/publicacao/2025-06/nota-tecnica-padrao-glocal-e-pilhas-de-esteril.pdf>. Acesso em: 23 set. 2025.

Bestel, A. L. M. C.; Reis, L. S.S.; Sanchez P. F. Análise Comparativa da Estabilidade de Barragens de Rejeitos Em Modelos Representativos De Estudo Construídos Pelos Métodos de Alateamento à Montante, à Jusante e Linha de Centro. 2020. *In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, 2020.

De Oliveira, D. B. Empilhamento de rejeito arenoso filtrado: comparação entre técnicas de compactação com trator de esteira e rolo compactador. 2024. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

Diemer, F. *et al.* Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 12, p. 25-36, 2008.

Dimitriadis, D.; Zachareas, E.; Gazea, V. Upgrading of a Tailings Management Facility for the Disposal of Dry Stack Tailings. *Mater. Proc.* 2021, 5, 132. Doi: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005132>.

Elói, F. P. F. Ativação alcalina do rejeito de barragem de minério de ferro com adição de sílica ativa. 2020. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

Fernandes, R. F.; Rodrigues, S. E. Estudo para Utilização de Tubos Geotêxtil para acomodação de Rejeitos e Estéril em Sistemas de Disposição por Backfill. *In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.*, Belo Horizonte, 2016.

Ferreira, D. B. Liquefação de rejeitos de minério de ferro—estudo de caso: sistema pontal em Itabira/MG. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado m Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

Ferreira, L. C. Influência do cimento Portland no empilhamento do rejeito de barragem de minério de ferro. 2022. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

Ferreira, D. L. T. Proposta de método para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril e verificação da eficiência do uso de cal como revestimento de proteção. 2025. 128 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Filho, A. M. R. *et al.* Influência do cimento de baixo carbono no empilhamento do rejeito de minério de ferro. *In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO*, 9., 2025. Anais [...]. [S. l.], 2025. p. 18. DOI: 10.46421/enarc.v9i1.7379. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/7379>. Acesso em: 25 jan. 2026.

França, T. R. S. Monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos. 2023. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

Ghimire, U.; Bheemasetti, T. V.; Kim, H. Performance of stabilized copper mine tailings with freeze-thaw and wet-dry seasonal cycles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 17, n. 3, p. 1418-1428, 2025.

Gontijo, M. D. Manuseio e aproveitamento de estéreis em mineração. *Revista Engenharia de Interesse Social*. v. 6 n. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36704/25256041/reis.v6i8.6005>.

Hoch, B. Z. *et al.* Mechanical and Microstructural Behavior of Mine Gold Tailings Stabilized with Non-Conventional Binders. *Minerals* 2025, 15, 995. DOI: <https://doi.org/10.3390/min15090995>.

Hossain, Md. U. *et al.* Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 597-608, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.048>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. Instituto Brasileiro de Mineração, 2016. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2016/05/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Mineração Usiminas investe em planta de filtragem de rejeitos. 04 jun. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineracao-usiminas-investe-em-planta-de-filtragem-de-rejeitos/>. Acesso em: 24 set. 2025.

Junior, M. C. *et al.* Rejeitos De Mineração: Um Olhar Do Cenário Brasileiro - Parte I: Cadeia Produtiva, p. 228-240. In: 18º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-30523.

Lozano, F. A. E. Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Luz, A. B.; Lins, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

Machado, L. S. Estabilização de rejeitos de minério de ferro filtrados com uso de aditivos para disposição em pilhas compactadas (dry stacking). 2022. 290 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

Machado, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Marques, M.S.; Lara, J.L.M., Almora, J.P. Disposição De Rejeitos – Um Desafio Para a Indústria Mineira. In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas, 2015. Disponível em: <https://publicacoes.entmme.org/?search=DISPOSI%C3%87%C3%83O+DE+REJEITOS+%E2%80%93+UM+DESAFIO+PARA+A+IND%C3%9ASTRIA+MINEIRA>. Acesso em: 24 dez. 2025.

Martinatto, C. S. *et al.* Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro 2024. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, 2024.

Matias, A. C. P. Influência da adição de composto estabilizador no comportamento reológico de rejeitos de minério de ferro depositados em barragens. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

McGregor, M.; Newman, P.; López, A. Hydraulic dewatered stacking—developing strategies for Brownfield applications at Mogalakwena, South Africa. *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2023, Vancouver, 2023*. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/our-stories/innovation-and-technology/hydraulic-dewatered-stackingdeveloping-strategies.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2025.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. IBRACON: São Paulo, 2008.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (MPMG). *Diretrizes técnicas e socioambientais para projetos de pilhas de rejeitos de mineração*. Belo Horizonte: MPMG, 2024. Elaborado por Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) e AECOM do Brasil.

Morais, F. T. C. *Desempenho de um empilhamento drenado de tubos geotêxteis preenchidos com rejeito de mineração de ouro*. 2020. 207 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

Moreira, B. O. *Viabilidade econômica de lavra de empilhamento drenado*. 2021. 48 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

Moura, J. E. M.; Leão, M. F. *Automatização de instrumentos de monitoramento em barragens de rejeito no Pará—método construtivo, aplicabilidade e custo para mineradoras*. In: *XX Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, 2018.

Newman, Phil *et al.* *Successes with hydraulic dewatered stacking at the el soldado demonstration facility*. In: *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2023, Vancouver, 2023*. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v5/PLC/our-stories/innovation-and-technology/successes-with-hydraulic-dewatered-stacking-at-El-Soldado.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2025.

Newman, Phil *et al.* *Hydraulic Dewatered Stacking—delivering desaturated tailings management without the capital cost of filtration*. In: *10th International Conference on Tailings Management, Santiago, Chile, 2024*. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/our-stories/innovation-and-technology/hds-delivering-desaturated-tailings-management-without-the-capital-cost-of-filtration.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2025

Nogueira, M. A. *et al.* *Mitigating the socioeconomic impacts of the mining industry through Social Technologies: Guidelines for technology transfer between universities and communities*. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31(1), 54–68, 2024. <https://doi.org/10.1002/csr.2593>

Nxumalo, N. W.; Newman, P.; López, A. *A study on the possibilities, constraints, and motivation for transitioning a conventionally designed TSF into a full scale hydraulically dewatered stack (HDS) facility for fine residue disposal in South Africa*. In: *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2024, Colorado, 2024*. Disponível em: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/our-stories/innovation-and-technology/conventionally-designed-tsf-into-a-full-scale-hds-facility.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2025.

Oliveira, G. A *et al.* *Estabilização polimérica de rejeitos de minério de ferro para disposição em pilhas*. *Sete Editora*, [S. l.], pág. 996–1023, 2024. Disponível em: <https://sevenpubl.com.br/editora/article/view/3782>. Acesso em: 26 out. 2025.

Paixão, D. M. Alternativas de disposição de rejeito úmido na avaliação de impactos ambientais de atividades minerárias no estado de Minas Gerais. 2019. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Pedrosa, M. H. *et al.* Análise técnica e crítica dos sistemas de disposição de rejeitos da mineração. *In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Campinas, 2020.

Pimenta, J. The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass. *Proceedings Tailings and Mine Waste*, Vancouver, BC. 11p., 2011.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Queiroz, L. C. *et al.* Pilhas de estêreis e barragens de rejeitos. 1. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2024. 186 p.

Queiroz, V. O. Monitoramento geotécnico de estruturas de mineração. 2024. 99 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

Ramos, K. S.; Luz, J. A. M.; Milhomem, F. O. Da viabilidade de fabrico de vidro com resíduos de mineração. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, p. e13711929828, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.29828>.

Rodrigues, A. B. Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição. 2017. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

Sandroni, S. S.; Guidicini, G. Barragens de terra e enrocamento. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2023.

Santos, C. P. Estabilização de um rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

Silva, L. C. F. Utilização de tubos geotêxteis para confinamento, desaguamento e empilhamento de rejeito de ouro. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

Soeiro, R. C. Análise teórica de um circuito de moagem reversa através da utilização do software ModSimTM. 2024. 39 f. Artigo (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

Souza, C. V. Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

Souza, W. A. R. Análise numérica do comportamento de pilhas de rejeito filtrado e co-disposição durante a construção. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

Neto, A. T. Comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro cimentado: efeito da granulometria e das condições de compactação. 2024. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Thomé, Romeu; Lago, T. M. O. Barragens de rejeitos da mineração: o princípio da prevenção e a implementação de novas alternativas. *Revista de Direito Ambiental*, v. 85, p. 17-39, 2017.

Thomé, R.; Passini, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, [S. l.], v. 18, n. 34, p. 49–65, 2018.

Ulrich, B. Practical thoughts regarding filtered tailings, in AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds). *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste. Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics, pp. 71-79. 2019.

Vasconcelos, G. do C. Construção de aterros compactados com rejeito de mineração filtrado. 2021. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

Wagner, A. C. Influência da Granulometria no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Minério de Ferro. 2025. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.

Wayhs, C. A. S. P. Estudo do efeito da energia de compactação no comportamento mecânico de rejeitos de mineração de cobre - Cimento Portland. 2024. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.