



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
(ÊNFASE EM TECNOLOGIA MINERAL)

CRISTINA DE NAZARÉ BARRAL SIQUEIRA

**USO DAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA MINERAÇÃO: UMA ANÁLISE  
SISTEMÁTICA DA TECNOLOGIA *TAILINGS DRY BACKFILL* - TDB**

Ananindeua – PA  
2024

CRISTINA DE NAZARÉ BARRAL SIQUEIRA

**USO DAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA MINERAÇÃO: UMA ANÁLISE  
SISTEMÁTICA DA TECNOLOGIA *TAILINGS DRY BACKFILL* – TDB**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado ao curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (Enf. Tec Mineral), da Universidade Federal do Pará - Campus Ananindeua - Pará, como requisito básico para a obtenção do grau de bacharel.

Orientador(a): Professor Dr. Daniel José Lima de Sousa.

Coorientador(a): Msc. Mayra de Nazaré Barral das Neves.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

Siqueira, Cristina de Nazaré Barral.

    Usos das inovações tecnológicas na mineração: uma  
    análise sistemática da tecnologia Tailings Dry Backfill - TDB.  
/ Cristina de Nazaré Barral Siqueira, . — 2024.

    LXXXVIII, 88 f. : il. color.

    Orientador(a): Prof. Dr. Daniel José Lima de Sousa

    Coorientador(a): Prof<sup>a</sup>. MSc. Mayra de Nazaré Barral das  
    Neves

    Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade  
    Federal do Pará, , , Ananindeua, 2024.

    1. Rejeito. 2. Bauxita. 3. Mineração. 4. Tecnologia. 5.  
    Disposição de rejeito. I. Título.

CDD 622.0981

---

CRISTINA DE NAZARÉ BARRAL SIQUEIRA

**INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA MINERAÇÃO: UMA ANÁLISE SISTEMÁTICA  
DA TECNOLOGIA TAILINGS DRY BACKFILL - TDB**

Este trabalho foi julgado com o objetivo de obtenção do Grau de bacharelado em Ciência e Tecnologia (Enf. Tec Mineral), da Universidade Federal do Pará- Campus Ananindeua- Pará.

Orientador(a): Professor Dr. Daniel José Lima de Sousa.

Coorientador(a): Msc. Mayra de Nazaré Barral das Neves.

Data de aprovação: 01 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. DANIEL JOSÉ LIMA DE SOUSA  
(FCT/CANAN/UFPA - orientador)

---

Prof. Dr. FERNANDO ANTÔNIO DA SILVA FERNANDES  
(Campus Salinópolis/UFPA - Membro externo)

---

Profa. Dra. CAMILA NASCIMENTO ALVES  
(FCT/CANAN/UFPA - Membro interno)

---

Prof. Dr. VITOR LEÃO SANTANA  
(FCT/CANAN/UFPA - Membro interno)

Dedico este trabalho a Deus, que guiou meus passos, fortaleceu minha fé e me sustentou em cada desafio desta caminhada. Às mulheres mais importantes da minha vida: À minha mãe, que com seu amor incondicional, força e sabedoria foi e é o meu maior exemplo de coragem e dedicação. Sua fé em mim me sustentou nos momentos mais difíceis e me impulsionou a seguir em frente. À minha irmã, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e amor, mesmo nos dias em que eu duvidei de mim mesma. Este TCC é também de vocês, que sempre acreditaram nos meus sonhos. Com todo o meu amor e eterna gratidão.

## AGRADECIMENTO

Neste momento em que concluo mais uma etapa da minha vida, elevo meus agradecimentos aos que, com amor, amizade, fé e dedicação, contribuíram para a realização deste sonho.

Em primeiro lugar, agradeço ao soberano e onisciente Deus, cuidador e Pai fiel, que me guiou, fortaleceu e me sustentou em cada passo desta caminhada. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha mãe, Maria das Graças Almeida Barral, a mulher que foi e sempre será meu maior exemplo de força, amor e fé. Tudo que conquistei até aqui carrega suas mãos, seus ensinamentos e suas orações silenciosas. Você foi o alicerce que sustentou meus dias de luta e a esperança que iluminou meus dias de incerteza. Sempre guerreira, você nunca deixou de nos mostrar o melhor caminho, tanto para mim quanto para minha irmã, mesmo diante das maiores dificuldades. Cada sorriso meu é reflexo da sua coragem; cada vitória, é também sua. Obrigada por nunca soltar minha mão, mesmo quando o caminho parecia difícil. Este sonho também é seu, mãe, e ele é a prova viva do amor incondicional que você plantou em mim.

À minha irmã Mayra Barral, minha fonte constante de força e inspiração. Sua presença ao longo dessa jornada foi um farol, sempre iluminando os momentos mais difíceis com palavras de apoio e gestos de carinho. Agradeço por sua paciência, dedicação e, principalmente, por sempre acreditar em mim, mesmo quando a estrada parecia incerta. Você foi essencial para que eu chegasse até aqui, e sou eternamente grata por ter você como minha irmã.

Ao meu cunhado Shayann, sou grata pelo apoio que sempre demonstrou, estando ao lado da minha irmã e da nossa família em todos os momentos. Sua presença tornou esta caminhada ainda mais leve e agradável.

Ao meu sobrinho Navid, que mesmo tão pequeno, trouxe luz aos meus dias e uma força inexplicável que somente Deus pode explicar.

Ao meu pai, Roberto Fernandes Siqueira, que de sua maneira contribuiu para esta conquista, fazendo parte desta história.

Com gratidão especial, agradeço ao meu amigo/parceiro Alcides, cuja presença e companheirismo foram fundamentais para a superação dos desafios

encontrados. Em cada conversa, em cada gesto de amizade verdadeira, parceria e companheirismo encontrei forças para continuar acreditando no propósito que me trouxe até aqui.

À minha amiga Beatriz, que em meio às tempestades sempre trouxe alegria aos meus dias. Nos momentos em que o peso do mundo parecia insuportável, nossos sorrisos tornaram a caminhada mais leve. Sua amizade foi refúgio e luz durante essa jornada.

À minha tia Sônia e à minha prima Rayssa, que dividiram comigo o lar durante esta fase tão intensa, oferecendo apoio, amor e motivação para não desistir dos meus sonhos.

Aos amigos de curso, em especial à Mayara, por todo apoio, incentivo e amizade durante essa caminhada. Sua presença fez toda diferença nesse processo. À o Alan, Adriano, Silvio e Queren, pela parceria, amizade e companheirismo que tornaram essa trajetória acadêmica mais leve e significativa.

Ao corpo docente do Campus de Ananindeua-PA, do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, ênfase em Tecnologia Mineral, pela dedicação e profissionalismo que enriqueceram meu aprendizado e formação.

Com especial carinho e profunda gratidão, agradeço ao professor Dr. Daniel José Lima de Sousa, que acolheu este trabalho com dedicação, empenho e fé no meu potencial desde os primeiros passos. Sua orientação atenciosa, pautada na paciência, no comprometimento e no olhar humano, foi fundamental para que cada desafio fosse superado e cada dúvida transformada em aprendizado. Obrigada por acreditar neste projeto, mesmo quando muitos duvidaram, por me guiar com sabedoria e por contribuir não apenas para a construção deste trabalho, mas também para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao professor Bispo, por suas palavras de motivação e incentivo constantes, que sempre me impulsionaram a terminar essa jornada com coragem e determinação.

Aos professores Reginaldo Sabóia, professor Cristhian, professora Camila, professor Vitor, e a todos os demais docentes que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação acadêmica, deixo meu sincero agradecimento. Cada aula, conselho, palavra de incentivo e até mesmo cada desafio proposto foram

fundamentais para a construção do meu conhecimento e fortalecimento da minha trajetória. Sou grata por todo o comprometimento, pela partilha de saberes e pelo exemplo de dedicação que levarei comigo para além da vida acadêmica.

Aos professores e funcionários que estiveram presentes desde o ensino infantil, fundamental e médio, e que foram fundamentais na construção da base educacional que me trouxe até aqui.

Agradeço ainda a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para essa conquista, seja por meio de palavras de apoio, gestos de amizade, investimento de tempo ou incentivo nos momentos em que pensei em desistir.

Por fim, expresso minha gratidão à Universidade Federal do Pará — Campus Ananindeua, por ter sido o cenário desta fase tão importante, proporcionando não apenas formação acadêmica, mas também crescimento humano e social.

Que este trabalho seja apenas o começo de novas conquistas e realizações.

Muito obrigada a todos!

## EPÍGRAFE

*"A busca pelo conhecimento é um caminho sem fim, onde cada passo nos leva a novas descobertas e a uma compreensão mais profunda de nós mesmos e do mundo ao nosso redor."*

*- Autor Desconhecido.*

## RESUMO

Este estudo adota uma abordagem exploratória, qualitativa e analítica para investigar a tecnologia *Tailings Dry Backfill* (TDB) na disposição de rejeitos de bauxita, comparando-a com métodos convencionais. A pesquisa explora a sustentabilidade ambiental, a segurança técnica e operacional, e a aplicabilidade da TDB em processos industriais de outros minerais. A metodologia de pesquisa incluiu a seleção criteriosa de artigos relevantes, estudos de caso e diretrizes técnicas, oferecendo uma visão abrangente e crítica sobre a adoção da TDB. A TDB mostra-se ambientalmente adequada, reduzindo riscos e impactos ambientais, bem como promovendo o uso eficiente de áreas mineradas ao secar e confinar rejeitos. Em termos técnicos, a tecnologia oferece maior controle sobre hidratação e compactação, aumentando a estabilidade estrutural de depósitos de rejeito e diminuindo os custos operacionais e de manutenção. A análise sugere que, com adaptações, a TDB pode ser viável para outros minerais, destacando seu potencial de inovação e mitigação de impactos ambientais no setor mineral. Através dessa revisão, o estudo contribui para um melhor entendimento de suas vantagens e limitações, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e aplicações práticas no setor de mineração, com ênfase em soluções mais seguras e sustentáveis.

**Palavras-chave:** Rejeito. Bauxita. Mineração. Tecnologia. Disposição de rejeito.

## **ABSTRACT**

This study adopts an exploratory, qualitative, and analytical approach to investigate the Tailings Dry Backfill (TDB) technology in the disposal of bauxite tailings, comparing it with conventional methods. The research explores environmental sustainability, technical and operational safety, and the applicability of TDB in industrial processes of other minerals. The research methodology included the careful selection of relevant papers, case studies and technical guidelines, offering a comprehensive and critical view on the TDB adoption. TDB is environmentally adequate, reducing environmental risks and impacts, as well as promoting the efficient use of mined areas by drying and confining tailings. In technical terms, the technology offers greater control over hydration and compaction, increasing the structural stability of tailings deposits and reducing operating and maintenance costs. The analysis suggests that, with adjustments, TDB may be viable for other minerals, highlighting its potential for innovation and mitigation of environmental impacts in the mineral sector. Through this review, the study contributes to a better understanding of its advantages and limitations, providing subsidies for future research and practical applications in the mining sector, with an emphasis on safer and more sustainable solutions.

**Keywords:** Tailings. Bauxite. Mining. Technology. Tailings disposal.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Riscos de Liquefação em Barragens de Rejeitos.....	38
<b>Figura 2:</b> Blocos Estruturais.....	42
<b>Figura 3:</b> Estrutura do Bloco de acordo com a NBR 8492 (2012).....	42
<b>Figura 4:</b> Delineamento dos Artigos.....	45
<b>Figura 5:</b> Fluxograma - Processo de disposição com TDB.....	48

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Etapas do beneficiamento da bauxita para a produção de polpa.....	23
<b>Quadro 2:</b> Principais insumos utilizados na mineração de bauxita e seus impactos ambientais.....	26
<b>Quadro 3:</b> Tecnologias sustentáveis na mineração de bauxita e benefícios ambientais .....	26
<b>Quadro 4:</b> Principais impactos ambientais dos rejeitos de bauxita.....	30
<b>Quadro 5:</b> Vantagens e desvantagens das barragens convencionais.....	37
<b>Quadro 6:</b> Principais legislações e normas aplicáveis ao método TDB.....	65
<b>Quadro 7:</b> Comparação entre técnicas de disposição de rejeitos.....	69
<b>Quadro 8:</b> Impacto das técnicas de disposição de rejeitos no meio ambiente.....	70
<b>Quadro 9:</b> Comparação de custos entre barragens tradicionais e TDB.....	72
<b>Quadro 10:</b> Comparação de custos de manutenção ambiental.....	73
<b>Quadro 11:</b> Comparação de segurança entre barragens convencionais e TDB.....	74
<b>Quadro 12:</b> Comparação de estabilidade e segurança socioambiental.....	75

## **LISTA DE SIGLAS**

**TDB** - Tailings Dry Backfill

**ANM** - Agência Nacional de Mineração

**ICMM** - International Council on Mining and Metals

**ASI** - Aluminium Stewardship Initiative

**NBR** - Norma Brasileira

**PNSB** - Política Nacional de Segurança de Barragens

**UFOP** - Universidade Federal de Ouro Preto

**HDPE** - *High-Density Polyethylene*

**CO<sub>2</sub>** - *Carbon Dioxide* (Dióxido de Carbono)

**DF** - Distrito Federal

**ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas

**PNRS** - Política Nacional de Resíduos Sólidos

**CFEM** - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa .....	18
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Geral .....	20
1.2.2 Específicos .....	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 O minério de bauxita .....	21
2.2 Extração e processo produtivo de bauxita.....	23
2.2.1 Insumos na Mineração de Bauxita.....	25
2.3 Rejeito de Bauxita e Metodologias de Disposição .....	27
2.3.1 Metodologias convencionais .....	32
2.3.2 Tecnologia Tailings Dry Backfill .....	39
2.3.2.1 Outras alternativas de destinação: Aproveitamento de Lama Vermelha e Rejeitos para Produção de Tijolos .....	41
3 METODOLOGIA.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 Funcionamento do TDB: Passo a Passo.....	47
4.2 Análise da sustentabilidade ambiental da tecnologia <i>Tailings Dry Backfill</i> .....	50
4.2.1 Questões Ambientais e Reaproveitamento: Contribuições do TDB.....	51
4.3 Análise dos aspectos de segurança técnica e operacional da tecnologia <i>TDB</i> .....	52
4.4 Análise de aplicabilidade da tecnologia <i>Tailings Dry Backfill</i> – TDB no processo industrial de outros minerais .....	57
4.4.1 Aplicabilidade da Tecnologia Tailings Dry Backfill: Desafios e Exemplos Práticos.....	60

4.5 Critérios da ANM para a disposição de rejeitos .....	63
4.6 Comparativo entre o TDB e Métodos Convencionais de Disposição de Rejeitos.....	66
4.7 Variáveis que Influenciam a Escolha do TDB .....	68
4.7.1 Análise dos Impactos Econômicos Positivos do TDB.....	71
4.7.2 Eficiência e Segurança: O TDB como Alternativa Sólida .....	73
5 CONCLUSÃO .....	77
6 REFERÊNCIAS .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração de bauxita é importante na produção de alumínio, amplamente utilizado em várias indústrias, incluindo transporte, energia, embalagens e construção. O Brasil, com uma das maiores reservas de bauxita do mundo, concentra 91% de sua produção no estado do Pará. A extração de bauxita no Brasil geralmente utiliza o método de lavra em tiras, que envolve a abertura de tiras no solo para acessar o minério, seguido pelo beneficiamento que reduz a granulometria e posteriormente lavagem do minério para remover material argiloso e sílica livre, esse processo gera rejeitos, compostos principalmente de argila lavada (Cru Consulting, 2022).

A importância da mineração de bauxita no Brasil não se restringe apenas à sua contribuição econômica, mas também ao papel estratégico na cadeia produtiva do alumínio. Este metal é essencial para diversas aplicações devido às suas propriedades, como leveza, resistência à corrosão e alta condutividade térmica e elétrica. Portanto, a eficiência e a sustentabilidade na extração e no processamento da bauxita é importante para manter a competitividade da indústria brasileira no mercado global de alumínio.

A mineração desempenha um papel fundamental na economia global, fornecendo matérias-primas essenciais para vários setores industriais. No entanto, um dos maiores desafios enfrentados pela indústria é a gestão dos rejeitos gerados durante a extração e o beneficiamento dos minérios. Tradicionalmente, esses rejeitos são armazenados em barragens, que são estruturas projetadas para conter esses resíduos de forma segura, de forma que sejam projetados para evitar impactos ambientais adversos e garantir a segurança das comunidades próximas (Barral das Neves, 2023).

A gestão de rejeitos é uma questão crítica na mineração moderna. O armazenamento inadequado de rejeitos pode levar a desastres ambientais e sociais, como vazamentos e rompimentos de barragens, que têm consequências devastadoras. Portanto, a indústria precisa buscar constantemente melhorar as práticas de gestão de rejeitos, adotando tecnologias que minimizem os riscos e maximizem a segurança e a sustentabilidade.

Os rejeitos de bauxita são tradicionalmente armazenados em reservatórios construídos em terra, aproveitando a topografia local. Esses reservatórios contêm os rejeitos em forma de lama, que ao longo do tempo perdem umidade por evaporação,

infiltração e lixiviação, permitindo a reutilização da água. Dependendo da profundidade e do volume de rejeitos, forma-se uma camada seca com aspecto craquelado. Embora este método seja comum, ele apresenta desafios significativos em termos de manutenção e risco de falhas estruturais, além de ocupar grandes áreas (Barral das Neves, 2023; Ministério de Minas e Energia, 2024).

Os métodos convencionais de disposição de rejeitos, como as barragens, requerem gerenciamento adequado e monitoramento rigoroso para garantir sua integridade. Além disso, ocupam extensas áreas de terra que poderiam ser utilizadas para outros fins, aumentando a pegada ambiental das operações de mineração. A necessidade de encontrar soluções mais eficientes e seguras é um impulso para a inovação na gestão de rejeitos.

Desde 2017, a legislação brasileira e os padrões internacionais para empresas de mineração têm sido revisados e novas exigências criadas após acidentes fatais envolvendo barragens de rejeitos. Essas regulamentações visam melhorar a manutenção, operação e processos de descaracterização dessas estruturas (Brasil, 2020).

A revisão das normas de segurança e a implementação de novas regulamentações refletem a preocupação crescente com a sustentabilidade e a segurança na mineração. Essas mudanças legais exigem que as empresas adotem práticas mais robustas e transparentes na gestão de rejeitos, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para atender a esses novos padrões.

A conscientização crescente sobre os impactos ambientais e os riscos associados às barragens de rejeitos tem impulsionado a busca por tecnologias inovadoras e sustentáveis. Normas internacionais, como as estabelecidas pelo *International Council on Mining and Metals* (ICMM), e a legislação brasileira, como a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), incentivam o desenvolvimento e a implementação de tecnologias que promovam a segurança e a sustentabilidade na gestão de rejeitos (Barral das Neves, 2023; Ministério de Minas e Energia, 2024).

As diretrizes internacionais e as legislações locais desempenham um papel fundamental em direcionar as práticas da indústria de mineração para um futuro mais seguro e sustentável. Essas normas exigem uma abordagem holística que abrange desde a fase de planejamento até a operação e o fechamento das minas, garantindo que todas as etapas sejam conduzidas com responsabilidade ambiental e social.

Neste contexto, uma empresa de mineração de bauxita do município de Paragominas, no estado do Pará, desenvolveu a tecnologia *Tailings Dry Backfill - TDB*, com a proposta de eliminar a necessidade de construção e ampliação de barragens de rejeito, uma proposta que corrobora com a eliminação e redução de riscos associados aos métodos convencionais de disposição de rejeitos de mineração (Alves, 2023; Dhawan, 2023; Coelho, 2020).

## 1.1 Justificativa

Este trabalho, se justifica pela necessidade de estudos sobre o desenvolvimento de soluções que maximizem a segurança operacional e outros aspectos técnicos na gestão de rejeitos de mineração. O rompimento de barragens de rejeitos em Minas Gerais, como os desastres de Mariana e Brumadinho, destacou a possibilidade de falha associada aos métodos tradicionais de disposição de rejeitos e a necessidade de tecnologias mais seguras e sustentáveis (Costa, 2019).

Esses incidentes trágicos não apenas resultaram em perdas humanas e ambientais devastadoras, mas também chamaram a atenção global para a importância de melhorar as práticas de gestão de rejeitos (ANM, 2020). A busca por alternativas tecnológicas se tornou imperativa para prevenir futuros desastres e proteger as comunidades e ecossistemas ao redor das operações de mineração.

A legislação brasileira, especialmente a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB (Lei nº 12.334/2010), impõe rigorosos requisitos de segurança e gestão para barragens de rejeitos. Esta lei estabelece normas para a construção, operação e desativação de barragens, visando prevenir acidentes e minimizar os riscos ambientais e sociais (Ministério de Minas e Energia, 2024). Além disso, a atualização da legislação após os desastres mencionados reforçou a necessidade de uma gestão mais eficaz e segura dessas estruturas.

A atualização dessas normas após os desastres foi uma resposta direta à necessidade de aumentar a fiscalização e a implementação de medidas preventivas. As novas exigências legais forçam as empresas de mineração a adotar práticas mais rigorosas e transparentes, o que incentiva a inovação tecnológica e a melhoria contínua das operações de mineração (PNSB – lei nº12.334, 2010).

Normas internacionais, como as estabelecidas pelo ICMM, também promovem práticas seguras e ambientalmente responsáveis na gestão de rejeitos. O

ICMM incentiva a implementação de tecnologias que não apenas melhoram a segurança, mas também reduzem os impactos ambientais, promovendo uma mineração mais sustentável (ICMM, 2021).

A adoção de padrões internacionais de segurança e sustentabilidade é crucial para alinhar as práticas de mineração brasileiras às melhores práticas globais. Essas normas fornecem diretrizes que ajudam as empresas a operar de maneira mais responsável, contribuindo para a proteção ambiental e a segurança das operações de mineração.

Portanto, a análise e a adoção de tecnologias como o TDB são fundamentais para suportar o processo de melhoria da gestão de rejeitos no setor de mineração.

A crescente preocupação com a segurança, os impactos ambientais e o cumprimento de rigorosos padrões legais no setor de mineração têm impulsionado o desenvolvimento e a adoção de tecnologias inovadoras. Dentre essas, destaca-se a tecnologia *TDB*, que oferece uma abordagem promissora para minimizar riscos e maximizar a sustentabilidade das operações. Diante desse cenário, o presente estudo se propõe a contribuir para o avanço dos estudos sobre práticas minerárias mais seguras e sustentáveis, alinhadas às exigências legais e aos desafios ambientais contemporâneos.

Além disso, a pesquisa busca avaliar a viabilidade técnica da implementação dessa tecnologia, evidenciando seus potenciais benefícios não apenas em termos de segurança e sustentabilidade, mas também como uma referência para a governança no setor minerário, ao explorar esses aspectos, este estudo almeja fornecer uma análise sobre a técnica que possa servir de referência para tomada de decisão quanto a replicação do TDB em operações de outros minérios e outros locais

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Geral

Elaborar uma análise técnica e sustentável sobre a implementação da tecnologia Tailings Dry Backfill (TDB) na gestão de rejeitos de mineração, avaliando sua viabilidade, benefícios em segurança operacional, sustentabilidade ambiental e governança, com vistas a subsidiar decisões sobre sua replicação em diferentes contextos minerários.

### 1.2.2 Específicos

- Avaliar a eficiência técnica da tecnologia TDB na redução de riscos associados ao rompimento de barragens de rejeitos.
- Identificar os impactos ambientais e benefícios sustentáveis da aplicação da tecnologia TDB em operações minerárias.
- Realizar uma análise teórica sobre a aplicabilidade da tecnologia TDB em diferentes contextos e tipos de mineração, com base em estudos de caso e dados disponíveis na literatura.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 O minério de bauxita

A bauxita é um minério de alumínio encontrado na crosta terrestre, ela é a principal fonte de alumínio, um dos metais mais utilizados no mundo, a bauxita é composta principalmente de alumina (óxido de alumínio), mas também contém outros minerais como sílica, ferro e alumínio, a extração é da terra através de mineração e é processada em refinarias para produzir alumina, que é então processada em fábricas de alumínio para produzir o metal (ANM, 2020; Almeida; Wanderley, 2019)

A bauxita, sendo um recurso de grande importância econômica, não apenas serve como base para a produção de alumínio, mas também representa uma fonte significativa de emprego e desenvolvimento para regiões onde é extraída. Além de ser a principal matéria-prima para a indústria do alumínio, a mineração de bauxita sustenta cadeias produtivas inteiras, incluindo o transporte, a manufatura de máquinas pesadas e os serviços de engenharia (Almeida; Wanderley, 2019)

A bauxita é uma rocha composta por uma mistura de minerais de alumínio, sendo os mais importantes a gibbsita  $[Al(OH)_3]$ , e os polimorfos diásporo  $[\alpha-AlO(OH)]$  e boehmita  $[\gamma-AlO(OH)]$ . A coloração da bauxita varia dependendo da quantidade de óxidos de ferro presentes, com bauxitas brancas contendo entre 2% e 5% de óxidos de ferro, enquanto nas bauxitas vermelhas essa proporção pode chegar a 25% (Alves, 2021).

Além de sua composição mineralógica, a bauxita é notável por suas propriedades físicas, que a tornam uma matéria-prima ideal para a produção de alumina. A variação na coloração não afeta apenas a estética do minério, mas também pode indicar a presença de impurezas que influenciam o processo de refino. Em termos de processamento, a bauxita rica em gibbsita é preferida devido à sua solubilidade em soda cáustica, o que facilita a extração de alumina durante o processo Bayer, o método mais utilizado globalmente para refino de bauxita em alumina (Wanderley, 2019).

A bauxita é encontrada em países de todo o mundo, incluindo Austrália, Brasil, Guiné, Rússia e Jamaica (USGS, 2024). O alumínio é usado em uma ampla variedade de produtos, desde latas de bebidas até aviões e linhas de transmissão elétrica. Devido à sua versatilidade e à sua baixa densidade, o alumínio é considerado um

metal valioso e muito importante na indústria moderna. (Figueirôa, 1994; Cru Consulting, 2022).

A distribuição global dos depósitos de bauxita reflete a geologia diversificada do planeta, com cada país contribuindo de maneira única para o mercado global de alumínio. A Austrália, por exemplo, lidera a produção mundial de bauxita, enquanto o Brasil se destaca pela alta qualidade de seu minério (USGS, 2024). Esse panorama global cria uma interdependência econômica, onde a oferta e a demanda de bauxita e alumínio são influenciadas por fatores geopolíticos, políticas comerciais e avanços tecnológicos. Assim, o alumínio, derivado da bauxita, continua a ser essencial para o progresso tecnológico e econômico em um mundo cada vez mais industrializado.

O Brasil possui algumas das maiores e melhores reservas de bauxita do mundo, produzindo minérios que atendem aos padrões internacionais para uso metalúrgico e não metalúrgico. As reservas brasileiras são predominantemente de grau metalúrgico, representando cerca de 90,75% das reservas totais, enquanto o restante é de grau não-metalúrgico (Alves, 2021).

A bauxita é o minério mais importante para a obtenção de alumínio metálico. Para que a produção de alumínio primário seja economicamente viável, a bauxita deve conter pelo menos 30% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a maioria das bauxitas economicamente aproveitáveis contém entre 50% e 55% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alves, 2021).

A concentração de óxido de alumínio na bauxita é um fator determinante para a viabilidade econômica da mineração e refino do minério, depósitos com teores mais altos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são preferidos, pois exigem menos processamento para extrair a quantidade necessária de alumina, resultando em custos operacionais mais baixos e maior eficiência energética. Isso é particularmente importante em um setor onde a competitividade é alta e as margens de lucro podem ser estreitas, levando as empresas a buscar constantemente maneiras de otimizar seus processos de extração e refinação (Alves, 2021).

A bauxita é essencial na produção global de alumínio, sendo a matéria-prima primordial. Para transformar a bauxita em alumina, que é a base para a produção de alumínio, o minério passa por processos de beneficiamento, incluindo moagem e lavagem. Esse beneficiamento resulta em uma polpa de bauxita, necessária para a produção de alumina, enquanto os rejeitos, compostos principalmente de argila, são descartados, geralmente depositados em estruturas de terra. (Cru Consulting, 2022; Abal, 2022; Barral das Neves, 2023).

Quadro 1: Etapas do Beneficiamento da Bauxita para a Produção de Polpa.

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Moagem</b>	Redução do tamanho das partículas de bauxita para melhorar a eficiência dos processos subsequentes.
<b>Lavagem</b>	Remoção de argilas, redução de sílica e outras impurezas solúveis da bauxita por meio de lavagem com água.
<b>Classificação</b>	Separação das partículas de bauxita por tamanho, melhorando a eficiência dos processos seguintes.
<b>Deslamagem</b>	Remoção de partículas ultrafinas de argila e outros materiais indesejáveis através de ciclones e espessadores.
<b>Flotação</b>	Separação de impurezas como ferro e sílica, utilizando reagentes químicos e aeração da polpa.
<b>Secagem</b>	Remoção do excesso de umidade da bauxita úmida para otimizar a moagem e reduzir o consumo de energia.

**Fonte:** Adaptado de Barral das Neves (2023).

O Brasil é um dos principais detentores de reservas de bauxita no mundo, com minérios de alta qualidade que contêm mais de 40% de alumínio aproveitável. A maior parte da produção de bauxita no país está concentrada no estado do Pará, que responde por 91% da produção nacional, destacando o Brasil como um player importante no mercado global de alumínio (Abal, 2017).

O estado do Pará, com suas vastas reservas de bauxita, tem se consolidado como um dos maiores polos de mineração do mundo (ANM, 2020). A infraestrutura desenvolvida na região, incluindo estradas, portos e instalações de beneficiamento, tem sido importante para suportar as operações em larga escala necessárias para atender à demanda global por alumínio (HYDRO, 2020). Além disso, o setor de mineração no Pará gera impactos socioeconômicos significativos, desde a criação de empregos diretos até o desenvolvimento de comunidades locais, destacando o papel do Brasil na cadeia de suprimentos global de alumínio.

## **2.2 Extração e processo produtivo de bauxita**

No Brasil, a extração da bauxita é majoritariamente realizada por meio da lavra em tiras, um método que permite o acesso às camadas ricas em minério. Após a extração, o minério é submetido a várias etapas de beneficiamento, que incluem britagem, homogeneização, moagem e peneiramento, entre outras. Esse processamento é essencial para preparar o minério para a produção de alumina e gera subprodutos conhecidos como rejeitos, que são geralmente dispostos em barragens ou reservatórios (Alves, 2015)

O processo de extração da bauxita começa com a remoção planejada da vegetação e do solo orgânico, o que é fundamental para expor os depósitos de bauxita subterrâneos. Após essa remoção, as camadas superiores do solo, como argilas e lateritas, são retiradas, permitindo o acesso direto às reservas de bauxita, onde o minério é extraído (Alves, 2021; Hydro, 2020; MRN, 2021). Na lavra em tiras, as cavas são abertas para a remoção do minério e, em seguida, são fechadas à medida que a lavra avança, garantindo a continuidade do processo de mineração e a recuperação da área impactada.

Essa fase inicial é fundamental não apenas para garantir a eficiência da extração, mas também para minimizar os impactos ambientais, a remoção controlada da vegetação e do solo deve ser realizada com o objetivo de permitir a reabilitação futura da área minerada, tornando possível a recuperação da biodiversidade local e o uso sustentável do solo após o término das atividades de mineração (Mineração Rio do Norte, 2021).

O processo de beneficiamento da bauxita é fundamental para garantir a pureza e a qualidade do alumínio produzido, a separação eficiente dos rejeitos é crucial não só para otimizar a produção, mas também para minimizar o impacto ambiental da mineração, as técnicas modernas de beneficiamento, que incluem o uso de tecnologias avançadas de separação e tratamento de resíduos, têm permitido que as mineradoras operem de maneira mais sustentável, reutilizando a água e reduzindo a pegada ecológica das operações de extração e refino (Mineração Rio do Norte, 2021).

Essas etapas de beneficiamento são essenciais para garantir que o minério esteja nas condições ideais para o processamento seguinte. A britagem, por exemplo, não só facilita o manuseio do minério, como também aumenta a eficiência dos processos que vêm depois, como a moagem e a extração. A lavagem, além de remover impurezas, ajuda a reduzir custos e a melhorar a qualidade da alumina produzida, eliminando materiais indesejáveis que poderiam prejudicar o processo (Hydro, 2020; MRN, 2021).

Durante o processo inicial de beneficiamento da bauxita, tanto na etapa de mineração quanto no refino para a produção de alumina, são gerados resíduos específicos. Esses resíduos, resultantes do refino da bauxita, são encaminhados para áreas licenciadas de disposição de resíduos, onde são gerenciados de acordo com as normas ambientais aplicáveis (Alves, 2021; Hydro, 2020; MRN, 2021).

A gestão desses resíduos é uma questão de grande importância para as indústrias do setor, a destinação adequada dos rejeitos não apenas atende às exigências regulatórias, mas também representa um compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental. Técnicas como o empilhamento a seco e a revegetação das áreas de disposição de resíduos são exemplos de práticas que buscam mitigar os impactos ambientais e promover a reutilização dos recursos naturais envolvidos no processo de mineração (Alves, 2021).

A compactação dos resíduos gerados durante os processos convencionais de beneficiamento de bauxita é crucial para facilitar o armazenamento seguro e eficiente. Esse procedimento não só reduz o risco de contaminação ambiental, como também acelera a reabilitação das áreas utilizadas para o armazenamento de rejeitos, permitindo um uso mais sustentável do espaço disponível (Hydro, 2020; MRN, 2021).

### 2.2.1 *Insumos na Mineração de Bauxita*

Segundo Assunção (2024), a bauxita é uma das matérias-primas mais intensivas em termos de insumos, como energia, água e reagentes químicos, esses insumos são necessários para garantir a eficiência do processo, mas o uso inadequado pode acarretar sérios danos ambientais, como a contaminação hídrica e a degradação de áreas ao redor das minas.

De acordo com Castilho et. al (2020) no processo de beneficiamento da bauxita, a água é um insumo essencial, utilizada em várias etapas, como na lavagem do minério e na separação dos rejeitos. Após o uso, a água é tratada e reutilizada, contribuindo para a redução no consumo de novos recursos hídricos. Produtos como floculantes são utilizados na etapa de espessamento e auxiliam na separação entre sólidos e líquidos, otimizando o tratamento dos rejeitos.

Além disso, o uso de energia é outro fator importante nesse processo, e as empresas mineradoras têm buscado fontes renováveis para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de carbono. Esse esforço faz parte de uma abordagem mais sustentável da indústria, com a adoção de tecnologias que diminuem a dependência de fontes de energia convencionais, promovendo uma operação mais limpa e eficiente (Alves, 2023).

Outro insumo utilizado são os produtos químicos, como floculantes, que são utilizados para melhorar a sedimentação dos rejeitos e a separação entre sólidos e

líquidos. O uso desses produtos, em combinação com técnicas como o Tailings Dry Backfill (TDB), permite uma gestão mais controlada e segura dos rejeitos, contribuindo para a recuperação de áreas mineradas e reduzindo a necessidade de novas barragens. (Alves, 2023; CASTILHO, 2020).

Quadro 2: Principais insumos utilizados na mineração de bauxita e seus impactos ambientais.

Insumo	Função	Impacto Ambiental
Água	Utilizada na lavagem do minério e separação de rejeitos.	Pode causar contaminação hídrica se não tratada adequadamente; degradação de áreas.
Energia	Necessária para o funcionamento de equipamentos como britadores e espessadores.	Aumento das emissões de CO <sub>2</sub> se fontes não-renováveis forem usadas.
Floculantes	Auxiliam na separação de sólidos e líquidos na etapa de espessamento de rejeitos.	Resíduos químicos podem causar alterações na qualidade da água e o solo.

Fonte: Adaptado de Breno Castilho (2020) e Assunção (2024).

De acordo com Azevedo et al. (2018), a implementação de práticas que otimizem o uso de insumos na mineração de bauxita é crucial para reduzir os impactos ambientais, a reutilização de água no processo de lavagem e o uso de energia renovável são exemplos de como a indústria tem buscado soluções mais sustentáveis.

Segundo Alves (2023), a Hydro Paragominas adotou o *Tailings Dry Backfill* para reutilizar os rejeitos de bauxita e preencher cavas de áreas mineradas, reduzindo a necessidade de novas barragens. Isso não só diminui o uso de água e energia no processo de disposição de rejeitos, mas também elimina a necessidade de materiais adicionais para ampliação e construção de novas barragens para disposição de rejeitos.

Quadro 3: Tecnologias sustentáveis na mineração de bauxita e benefícios ambientais.

Tecnologia	Insumo Impactado	Benefício Ambiental
Reutilização de água	Água.	Reduz o consumo de novos recursos hídricos e diminui a contaminação de corpos d'água.
Uso de energia renovável	Energia.	Reduz as emissões de gases de efeito estufa, diminuindo o impacto climático.

Continuação do Quadro 3.		
Tecnologia	Insumo Impactado	Benefício Ambiental
Tailings Dry Backfill (TDB)	Rejeitos, Materiais de contenção. Água, de	Reduz a necessidade de novas barragens e materiais, além de reutilizar rejeitos.

Fonte: Adaptado de Alves (2023) e Azevedo et al. (2018).

De acordo com Bellmann et al. (2015), o uso eficiente de insumos na mineração de bauxita é determinante para garantir a sustentabilidade do setor, a energia e a água representam os maiores desafios em termos de sustentabilidade, mas práticas como a utilização de energias renováveis e a implementação de sistemas de tratamento e reutilização de efluentes podem ajudar a mitigar esses impactos.

No beneficiamento da bauxita, a água é um dos principais insumos utilizados, sendo crucial para etapas como a lavagem e separação do minério. A energia é outro insumo essencial no processo, necessária para alimentar equipamentos como britadores e espessadores. Já os produtos químicos, como floculantes e aditivos, são insumos fundamentais para otimizar a separação de rejeitos, melhorando a eficiência do processo de agregação de sólidos e a reutilização de água (Quaresma et al, 2022 *apud* Barral das Neves, 2023). Assim, se destaca que o rejeito de bauxita destinado através do TDB é um material inerte, subproduto beneficiado fisicamente (britagem, moagem e espessamento) que não recebe produtos químicos classificados como perigosos durante o processamento (Castilho et al, 2020; Alves, 2023; Pantoja, 2021).

### 2.3 Rejeito de Bauxita e Metodologias de Disposição

De acordo com Assunção (2019), os rejeitos de bauxita são subprodutos inevitáveis do processo de extração e refino do alumínio, um dos metais mais amplamente utilizados no mundo. A bauxita, o principal minério utilizado na produção de alumínio, passa por um processo de beneficiamento que inclui a moagem, a classificação granulométrica e a remoção de impurezas, durante esses procedimentos, são gerados grandes volumes de resíduos, comumente chamados de lama vermelha ou lama de bauxita, devido à sua coloração característica, que é resultante da alta concentração de óxidos de ferro e outros minerais presentes na composição do minério de bauxita.

Nogueira et al. (2021, p.05) descreve a bauxita da seguinte maneira:

A bauxita é uma rocha sedimentar de coloração avermelhada, composta de dióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e outros componentes que se apresentam em quantidades menores, tais como sílica, dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), silicato de alumínio e óxidos de ferro e seus principais constituintes isomórficos: gibbsita, bohemita e diásporo. Seu nome remete à cidade de Le Baux, na França, onde a rocha foi identificada pela primeira vez, no ano de 1821, pelo geólogo Pierre Berthier.

O rejeito de bauxita é um material argiloso composto principalmente por óxidos de ferro e sílica, o que explica sua cor avermelhada. Em relação à acidez, nos casos em que a bauxita passa exclusivamente por processos físicos de beneficiamento, o rejeito de bauxita possui pH baixo (Barral das Neves, 2023), diferente do resíduo industrial do processo *bayer* (lama vermelha), por exemplo, que por passar por tratamento com soda cáustica, apresenta característica de material altamente alcalino (Nierwinski, 2019).

Conforme argumenta Santiago (2018), a origem geológica da bauxita também influencia diretamente a composição dos rejeitos gerados, dependendo da localidade de extração, as características dos rejeitos podem variar consideravelmente, por exemplo, em regiões tropicais, onde a bauxita é geralmente formada por intemperismo prolongado de rochas aluminosas, a concentração de óxidos de ferro tende a ser mais alta, já em regiões com climas temperados, a presença de outros minerais, como a caulinita, pode ser mais prevalente, essas variações influenciam diretamente na quantidade e nas propriedades químicas dos rejeitos.

Costa (2010) explica que o processo de formação da bauxita envolve a degradação de rochas contendo alumínio, como granitos e basaltos, ao longo de milhões de anos, esse processo de intemperismo químico resulta na remoção de elementos solúveis, como o silício, enquanto concentra os elementos mais resistentes, como o ferro e o alumínio, a formação da bauxita é, portanto, um fenômeno que depende de diversos fatores ambientais, como o clima, o relevo e a presença de água subterrânea, a bauxita resultante desse processo é então extraída e submetida a técnicas industriais que geram os rejeitos atualmente discutidos.

Ainda segundo Nogueira (2021, p.09) pode-se entender por rejeitos:

Rejeito são rochas ou minerais inaproveitáveis presentes no minério e que são separados deste, total ou parcialmente, durante o beneficiamento. Ambos os resíduos minerais, estéril e rejeito, devem ser depositados em locais preparados para recebê-los, seguindo normas técnicas que minimizem os impactos ambientais que possam provocar contaminações dos solos, rios e ar e garantir o menor impacto visual possível.

Como apontado por Robertson (2010), além dos componentes minerais, os rejeitos de bauxita podem conter resíduos orgânicos e inorgânicos oriundos de aditivos químicos utilizados durante o beneficiamento do minério, esses aditivos são empregados para otimizar a separação de minerais desejáveis e indesejáveis, o que implica na introdução de substâncias adicionais, como flocculantes, surfactantes e compostos de enxofre, a presença dessas substâncias pode alterar significativamente as propriedades físico-químicas dos rejeitos, aumentando sua complexidade e os desafios para o seu manejo e disposição final adequada.

Cedro (2023) destaca que a composição química dos rejeitos também é influenciada pela concentração de elementos traço, que, embora presentes em pequenas quantidades, podem ter impactos ambientais significativos, esses elementos incluem metais pesados, como chumbo, mercúrio e zinco, que são tóxicos para a biota aquática e terrestre, mesmo em baixas concentrações, a bioacumulação desses metais ao longo da cadeia alimentar pode levar a efeitos adversos nos ecossistemas e na saúde humana, especialmente em comunidades próximas às áreas de mineração e disposição de rejeitos.

De acordo com Rodrigues (2012), do ponto de vista físico, os rejeitos de bauxita apresentam uma textura lamacenta, com partículas finas que podem permanecer em suspensão na água por longos períodos, essa característica dificulta o tratamento e a disposição segura dos resíduos, pois facilita o transporte de contaminantes para corpos d'água superficiais e subterrâneos, a alta alcalinidade dos rejeitos, aliada à sua capacidade de reter metais pesados e outras substâncias tóxicas, aumenta o risco de impacto ambiental, sendo necessário o desenvolvimento de tecnologias eficientes para sua neutralização e estabilização antes do descarte final.

Conforme mencionado por Nierwinski (2019), os impactos ambientais que podem ser causados pela má gestão dos rejeitos de bauxita são significativos e abrangem diversos problemas que podem afetar tanto o solo quanto os recursos hídricos. Conforme argumenta Rodrigues (2012), a alteração da qualidade da água é um efeito notável em caso de transbordo ou vazamento dos rejeitos de bauxita em corpos d'água, o que pode causar impactos em rios, lagos e aquíferos, comprometendo a qualidade da água e a biodiversidade aquática.

De acordo com Tinoco (2017), as partículas finas suspensas nos rejeitos podem se dispersar facilmente em caso de contato com a água, causando turbidez e

reduzindo a penetração de luz, o que interfere nos processos fotossintéticos, afetando a cadeia alimentar aquática. Tais impactos são resumidos na tabela abaixo, que destaca os principais efeitos dos rejeitos de bauxita no meio ambiente, com ênfase na alteração da qualidade do solo e da água.

Quadro 4: Principais Impactos Ambientais dos Rejeitos de Bauxita

<b>Impactos Ambientais</b>	<b>Descrição</b>
<b>Alteração da qualidade do Solo</b>	Alteração de características físico-químicas do solo.
<b>Alteração da qualidade da Água</b>	Em caso de contato, pode alterar características químicas de rios, lagos e aquíferos e aumento da turbidez devido à dispersão de partículas finas.
<b>Redução da Biodiversidade Aquática</b>	Impacto negativo na fauna e flora aquática pela diminuição da penetração de luz e alteração da qualidade da água.
<b>Risco à Saúde Humana e Animal</b>	Possibilidade de bioacumulação de metais pesados em organismos vivos, prejudicando a saúde de humanos e animais.
<b>Danos aos Ecossistemas Locais</b>	Risco de redução de habitats, erosão e perda de fertilidade do solo, afetando a vegetação nativa e a fauna terrestre em casos de ruptura, transbordo ou vazamentos.
<b>Necessidade de grandes extensões de terra</b>	Retenção de grandes áreas operacionais para disposição de rejeitos, incluindo em alguns casos a necessidade de supressão vegetal e outros possíveis impactos associados à implantação e manutenção das estruturas.

Fonte: Adaptado de Nierwinski (2019) e Cedro (2023).

Na perspectiva de Costa & Júnior (2021), a contaminação do solo e da água por rejeitos de bauxita representa uma ameaça substancial ao meio ambiente e à saúde pública. Segundo as conclusões de Costa (2010), o manejo inadequado desses rejeitos pode causar danos ambientais irreversíveis, afetando não apenas os ecossistemas locais, mas também as comunidades humanas que dependem desses recursos para sua subsistência e bem-estar.

Vale ressaltar o apontamento feito por Nogueira et al. (2021, p.09):

Levando em consideração o perigo que é o descarte inapropriado de rejeito, vê-se que no rejeito de lavagem da bauxita, há um dano potencial a natureza por se tratar de um rejeito constituinte primordialmente de argilominerais, caso haja um descarte indevido em rio, muda sua constituição, acarretando na impossibilidade de vida no mesmo.

Conforme explica Cedro (2023), a disposição adequada dos rejeitos de bauxita é um desafio crítico na mineração de alumínio, exigindo o uso de metodologias específicas para minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança das operações. Para os rejeitos gerados no processo de beneficiamento da bauxita, a escolha da metodologia de disposição depende de fatores como o volume de resíduos, as características do terreno, as condições climáticas e a proximidade de corpos d'água ou áreas sensíveis. Na visão de Nierwinski (2019), é essencial que essas metodologias sejam constantemente revisadas e aprimoradas para reduzir os riscos de contaminação e vazamentos.

De acordo com as considerações de Been e Jefferies (1985), uma das metodologias mais comuns para a disposição dos rejeitos de bauxita é o armazenamento em barragens de rejeito, essas estruturas são projetadas para conter grandes volumes de material, prevenindo sua dispersão no meio ambiente, porém, essa técnica exige manutenção constante e monitoramento rigoroso para evitar falhas, vazamentos ou rompimentos. Conforme argumenta Casagrande (1936), o uso de barragens tem sido criticado por seu potencial risco de rompimento, que pode resultar em desastres ambientais significativos e contaminação de vastas áreas.

Na perspectiva de Robertson (2010), uma solução para redução do volume de rejeitos gerados envolve o espessamento e o desaguamento dos rejeitos, técnica que visa reduzir o volume de água presente nos resíduos, permitindo sua compactação e deposição em locais específicos, essa abordagem minimiza o risco de derramamentos e permite uma recuperação mais rápida das áreas afetadas, conforme mencionado por Costa (2010), o espessamento dos rejeitos facilita o transporte e o manuseio dos resíduos, além de reduzir significativamente o espaço necessário para o armazenamento seguro, no entanto, essa metodologia pode exigir um maior investimento inicial em equipamentos e tecnologias de filtragem.

Segundo o levantamento de Casagrande (1936), técnicas mais recentes, como o empilhamento a seco, têm sido adotadas por algumas empresas mineradoras para minimizar os impactos ambientais, o empilhamento a seco consiste em desidratar os rejeitos até que adquiram uma consistência sólida, permitindo seu armazenamento em pilhas estáveis ao ar livre, essa metodologia reduz significativamente o risco de vazamento de líquidos e facilita a recuperação da área ao final da vida útil da mina, de acordo com a pesquisa de Cedro (2023), o empilhamento a seco também reduz a

pegada hídrica das operações de mineração, um fator importante em regiões onde a água é um recurso escasso.

Como apontado por Racanelli e Oliveira (2020), a reinjeção dos rejeitos em minas subterrâneas é outra prática que tem sido explorada para a disposição segura de resíduos, essa metodologia envolve o retorno dos rejeitos ao local de onde o minério foi extraído, preenchendo cavidades subterrâneas e estabilizando a estrutura geológica da mina, essa prática, além de reduzir a necessidade de grandes áreas de superfície para armazenamento, também pode diminuir o risco de contaminação ambiental, segundo as conclusões de Costa (2010), a reinjeção de rejeitos é uma solução potencialmente eficaz para regiões com limitações de espaço, mas exige um planejamento cuidadoso para evitar a contaminação das águas subterrâneas.

De acordo com o estudo de Cedro (2023), a escolha da metodologia de disposição de rejeitos deve ser baseada em uma análise detalhada dos riscos e benefícios associados a cada técnica, além de considerar as características específicas da operação de mineração e do meio ambiente circundante. Conforme argumenta Luz (2010), uma gestão eficiente dos rejeitos de bauxita requer o uso de tecnologias inovadoras e a adoção de práticas sustentáveis que priorizem a segurança ambiental e a saúde das comunidades locais, sendo fundamental que as empresas mineradoras invistam em soluções de longo prazo que promovam a recuperação de áreas degradadas e reduzam o impacto das suas atividades no ecossistema.

### 2.3.1 Metodologias convencionais

Conforme explicam Costa e Júnior (2021), as barragens de rejeito convencionais são estruturas utilizadas principalmente na indústria de mineração para o armazenamento temporário ou permanente dos rejeitos gerados durante o beneficiamento de minérios como a bauxita, essas barragens são projetadas para conter a lama resultante do processo de separação dos minérios de seus componentes não metálicos, normalmente compostas por resíduos sólidos misturados com grandes volumes de água, os rejeitos de bauxita, em particular, possuem uma consistência pastosa e altos teores de óxido de ferro, o que requer um armazenamento cuidadoso para evitar danos ambientais e riscos à saúde pública.

Segundo Luz (2010), as barragens de rejeito convencionais são estruturadas utilizando materiais locais, como solos compactados, rochas e argilas, a fim de criar uma barreira que previna o vazamento de material para o ambiente circundante, essas estruturas são geralmente construídas em terrenos inclinados, aproveitando a topografia natural para maximizar a capacidade de contenção dos rejeitos. Conforme argumenta Lima (2016), o processo de construção pode ser realizado em diferentes etapas, começando com a criação de um dique inicial, seguido pela elevação progressiva da barragem, à medida que o volume de rejeitos aumenta.

Rodrigues (2012, p. 24) salienta que:

A necessidade de usar barragens para o decantamento dos finos e o reaproveitamento da água se dá por conta do alto consumo de água envolvido no processo de beneficiamento (...). A bauxita é classificada de acordo com as proporções dos minerais constituintes, em dois tipos:

- a) Bauxita de grau metalúrgico: apresenta maior proporção de gibbsita.
- b) Bauxita de grau não metalúrgico ou refratário: apresenta maior proporção de diásporo.

De acordo com as considerações de Palheta (2019), o design das barragens de rejeito convencionais envolve diversos componentes-chave, incluindo o dique de contenção, a fundação e os sistemas de drenagem, o dique de contenção é geralmente a parte mais visível da barragem, formado por camadas compactadas de solos e rochas, que são dispostas de forma a garantir estabilidade estrutural, as fundações, por outro lado, devem ser cuidadosamente preparadas para resistir às pressões exercidas pelos rejeitos armazenados, enquanto os sistemas de drenagem têm a função de controlar o fluxo de água dentro e fora da barragem, reduzindo a pressão interna e evitando o risco de liquefação e falhas estruturais.

Conforme explicado por Robertson (2010), o objetivo principal das barragens de rejeito convencionais é fornecer um método seguro e eficiente para a disposição de resíduos sólidos e líquidos, especialmente em grandes operações de mineração onde os volumes de rejeitos são extremamente elevados, esses sistemas de armazenamento permitem que a água seja gradualmente removida dos resíduos, o que facilita a sedimentação dos sólidos e a recuperação de áreas ao redor da barragem.

Na visão de Nierwinski (2019), as barragens de rejeito convencionais são essencialmente projetadas para serem estruturas temporárias, mas, em muitos casos, acabam se tornando permanentes devido ao acúmulo contínuo de rejeitos ao longo

da vida útil da mina, isso requer monitoramento constante e manutenção regular para garantir que a barragem continue funcionando de maneira segura e eficaz. De acordo com o estudo de Lage (2018), a capacidade da barragem de rejeito depende de vários fatores, incluindo o volume de rejeitos, a estabilidade geotécnica do solo e as condições climáticas da região, bem como a qualidade da construção e os materiais utilizados.

As barragens de rejeito convencionais apresentam diferentes tipos de métodos de construção, como a barragem de montante, de jusante e de linha de centro, cada método possui características distintas que influenciam sua capacidade de armazenamento, resistência e segurança, a barragem de montante, por exemplo, é construída usando os próprios rejeitos como material de construção, oferecendo um custo mais baixo, porém com maior risco de instabilidade, enquanto a barragem de jusante, construída com materiais externos, proporciona maior estabilidade, mas a um custo mais elevado (Palheta, 2019; Nierwinski, 2019).

De acordo com as considerações de Santiago (2018), apesar de sua ampla utilização, as barragens de rejeito convencionais possuem limitações significativas, especialmente em termos de segurança e impacto ambiental, a grande quantidade de água contida nesses rejeitos aumenta o risco de rompimentos catastróficos, como ocorrido em desastres recentes. Conforme observa Robertson (2010), a construção e a manutenção inadequadas, juntamente com a falta de monitoramento contínuo, podem levar a falhas estruturais graves, resultando em grandes impactos ambientais e sociais.

Conforme detalha Lage (2018), a construção de barragens de rejeito convencionais envolve o uso de diversos materiais, sendo os solos compactados e rochas os mais comuns, esses materiais são selecionados com base em suas propriedades geotécnicas, como a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a estabilidade a longo prazo, os solos utilizados são geralmente extraídos da própria área de construção ou de regiões próximas, o que reduz custos e facilita a logística. Segundo o autor, o uso de materiais locais também é preferido porque se adapta melhor às condições do terreno e ao clima da região, aumentando a confiabilidade da estrutura.

De acordo com Tinoco (2017), as técnicas de compactação do solo são fundamentais na construção das barragens de rejeito, esse processo envolve a aplicação de energia mecânica para densificar o solo, removendo o ar e aumentando

sua resistência e estabilidade, a compactação é feita em camadas, com espessuras específicas, e cada camada é cuidadosamente compactada antes da aplicação da próxima, como observa o autor, esse método garante que o solo tenha a densidade e a coesão necessárias para suportar o peso dos rejeitos e a pressão da água, reduzindo assim o risco de liquefação e deslizamentos.

Conforme explicado por Been e Jefferies (1985), as rochas desempenham um papel crucial na construção de barragens de rejeito convencionais, especialmente na formação de diques de contenção e em outras partes críticas da estrutura, rochas como granito, basalto e calcário são frequentemente usadas devido à sua alta resistência e durabilidade, esses materiais são colocados em camadas, alternando com solos compactados, para criar uma barreira robusta e resistente ao desgaste, conforme argumenta o autor, o uso de rochas ajuda a reduzir a permeabilidade da barragem, evitando a infiltração de água e o consequente enfraquecimento da estrutura.

Na perspectiva de Tinoco (2017), outros materiais, como argilas e geomembranas sintéticas, também são usados para aumentar a impermeabilidade das barragens de rejeito, as argilas, por exemplo, têm uma baixa permeabilidade natural e podem ser usadas para revestir as superfícies internas da barragem, minimizando o fluxo de água, geomembranas sintéticas, como as feitas de polietileno de alta densidade (HDPE), são instaladas como revestimentos adicionais para proporcionar uma camada extra de proteção contra vazamentos e infiltrações, de acordo com o autor, a combinação desses materiais contribui para aumentar a segurança e a eficiência da barragem.

Segundo as conclusões de Robertson (2010), técnicas de construção como o método de jusante, montante e linha de centro são aplicadas dependendo das condições do terreno e dos materiais disponíveis, o método de jusante, por exemplo, envolve a construção da barragem na direção da corrente de água e é considerado um dos mais seguros, pois proporciona maior estabilidade estrutural, já o método de montante utiliza os próprios rejeitos como material de construção, resultando em um custo mais baixo, mas com maior risco de instabilidade, o método de linha de centro, por sua vez, combina elementos dos dois primeiros, oferecendo um equilíbrio entre custo e segurança.

Para Rodrigues (2012), o controle da drenagem é outro aspecto essencial na construção das barragens de rejeito, sistemas de drenagem interna, como drenos de

areia ou rocha, são instalados para coletar e direcionar a água acumulada para fora da barragem, prevenindo o aumento da pressão interna e possíveis falhas estruturais, conforme mencionado pelo autor, a drenagem eficiente é crucial para manter a integridade da barragem, especialmente durante períodos de chuvas intensas ou inundações.

De acordo com o estudo de Cedro (2023), as técnicas de monitoramento e manutenção também fazem parte dos métodos utilizados na construção de barragens de rejeito convencionais, equipamentos de monitoramento, como piezômetros, inclinômetros e medidores de deslocamento, são instalados para acompanhar a pressão da água, os movimentos do solo e outras variáveis críticas, esses dados permitem a detecção precoce de possíveis problemas, permitindo ações corretivas antes que se tornem grandes riscos.

Segundo as conclusões de Assunção (2021), as barragens de rejeito convencionais apresentam tanto vantagens quanto desvantagens significativas no armazenamento de resíduos de mineração. De acordo com Nierwinski (2019), uma das principais vantagens dessas estruturas é a capacidade de armazenar grandes volumes de rejeitos, o que é essencial para operações de mineração de larga escala. Além disso, o uso de materiais locais, quando disponíveis, como solos compactados e rochas, reduz os custos de construção e permite uma implementação relativamente rápida. Por outro lado, ao passo que comportam grandes volumes de rejeito, estruturas convencionais de larga escala demandam grandes extensões de terra e volume de material para construção dos diques, o que implica em maiores impactos ambientais para sua implementação.

Conforme explicado por Been e Jefferies (1985), essas barragens também possibilitam a recuperação de áreas próximas à mineração, pois, ao concentrar os rejeitos em um único local, minimizam a dispersão dos resíduos pelo ambiente, no entanto, as barragens convencionais apresentam desvantagens notáveis, como o risco de rompimento devido a falhas estruturais ou eventos climáticos extremos.

Segundo Tinoco (2017), os rompimentos podem resultar em desastres ambientais significativos, liberando grandes quantidades de rejeitos tóxicos em rios, solos e comunidades. Além disso, a necessidade de manutenção constante e monitoramento rigoroso aumenta os custos operacionais a longo prazo, tornando essa opção menos atrativa em termos de sustentabilidade e segurança.

Quadro 5: Vantagens e Desvantagens das Barragens Convencionais

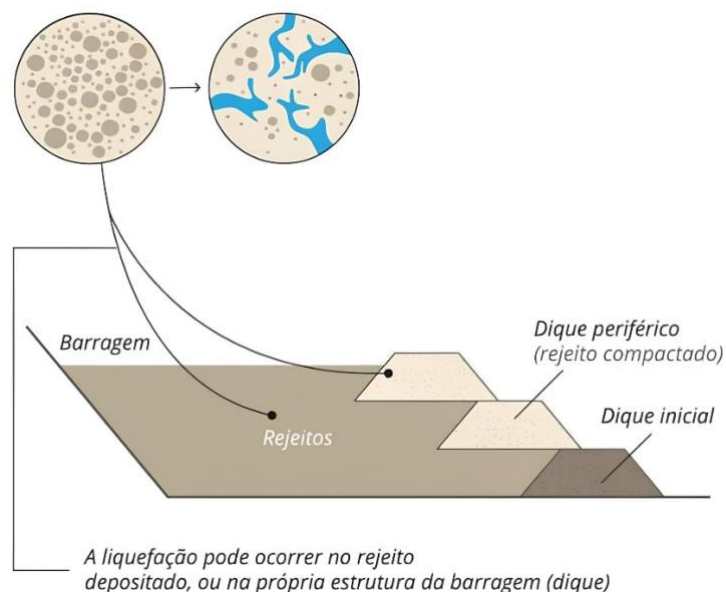
<b>Aspecto</b>	<b>Descrição</b>
<b>Vantagens</b>	Capacidade de armazenar grandes volumes de rejeitos, aproveitamento da topografia local - reduzindo custos, implementação relativamente rápida, controle de resíduos em um único local.
<b>Desvantagens</b>	Risco de rompimento com potenciais desastres ambientais, necessidade de manutenção constante e monitoramento, custos operacionais elevados a longo prazo, necessidade de grandes extensões de área para sua implementação, necessidade de grandes volumes de material para conformação e compactação, necessidade de ampliação e alteamentos ao longo do tempo, limitações associadas ao processo de descaracterização.

Fonte: Adaptado de Cedro (2023) e Nierwinski (2019).

Na visão de Costa (2019), enquanto as barragens convencionais oferecem uma solução viável para a disposição de grandes quantidades de rejeitos, seu uso é acompanhado de riscos significativos que exigem uma gestão cuidadosa e contínua. De acordo com Cedro (2023), embora sejam uma opção amplamente utilizada devido ao seu custo-benefício inicial, é essencial que sejam adotadas práticas de engenharia e segurança rigorosas, bem como tecnologias inovadoras, para mitigar os riscos associados e promover uma gestão de rejeitos mais segura e sustentável.

A Figura 1 ilustra o processo de liquefação, um fenômeno crítico que pode ocorrer em barragens de rejeitos de mineração, a liquefação transforma materiais sólidos, como os rejeitos, em um estado fluido, colocando em risco a integridade estrutural da barragem. O diagrama destaca como o excesso de água, a presença de abalos sísmicos e falhas nos sistemas de drenagem são fatores principais que contribuem para a liquefação, as ilustrações da parte superior esquerda da Figura 1 demonstram os rejeitos em duas condições: compactados e saturados de água.

**Figura 1:** Riscos de Liquefação em Barragens de Rejeitos



Fonte: Melo (2019)

Na parte inferior da Figura 1, vemos a estrutura de uma barragem com um dique inicial e um dique periférico, projetado para suportar os rejeitos compactados, no entanto, quando ocorre a liquefação, tanto o rejeito depositado quanto a própria estrutura do dique podem ser afetados, aumentando o risco de colapso, esse processo transforma o solo ou material sólido em algo semelhante a um líquido, perdendo sua capacidade de sustentação.

Com a Figura 1 destaca-se que, com o controle adequado do excesso de água, manutenção da drenagem e monitoramento sísmico, é possível reduzir os riscos de liquefação e, assim, prevenir desastres ambientais.

Conforme explicado por Nierwinski (2019), os mecanismos de contenção e monitoramento são essenciais para garantir a estabilidade das barragens de rejeito e a segurança ambiental, sendo que, entre os principais sistemas utilizados, destacam-se os dispositivos de drenagem interna, os piezômetros e os inclinômetros. Os dispositivos de drenagem interna, como drenos de areia e rocha, são projetados para controlar a pressão da água dentro da barragem, evitando o aumento excessivo que poderia comprometer a integridade estrutural da barragem, de acordo com Santiago (2018), esses sistemas ajudam a canalizar a água acumulada para fora da estrutura, reduzindo o risco de liquefação e possíveis deslizamentos.

Na visão de Robertson (2010), os piezômetros são instrumentos críticos instalados ao longo da barragem para medir a pressão da água nos poros do solo,

forneendo dados em tempo real sobre o estado de saturação do solo, essas informações são fundamentais para detectar variações que possam indicar o risco de instabilidade ou falha estrutural. Conforme argumenta Been e Jefferies (1985), os inclinômetros, por sua vez, são utilizados para monitorar o movimento do solo e a inclinação da barragem, permitindo a identificação de deslocamentos que possam preceder um colapso. Segundo Cedro (2023), o uso combinado desses sistemas de monitoramento, aliado à análise de dados contínua, é vital para antecipar problemas e realizar intervenções preventivas antes que ocorram acidentes.

De acordo com as considerações de Cedro (2023), o uso de barragens de rejeito convencionais está associado ao risco de causar impactos ambientais que podem afetar tanto os ecossistemas aquáticos quanto terrestres, um dos impactos mais comuns é a alteração da qualidade da água, que ocorre quando há vazamentos ou transbordamentos dos rejeitos armazenados. Conforme apontado por Nierwinski (2019), esses eventos podem comprometer a qualidade da água, afetando a fauna e a flora aquática, bem como colocando em risco a saúde das comunidades humanas que dependem desses recursos para consumo humano, pesca ou irrigação.

Segundo o levantamento de Casagrande (1936), outro impacto significativo é a alteração da qualidade do solo, que pode ocorrer quando resíduos do processo *bayer* entram em contato com o solo, podendo liberar substâncias tóxicas, como arsênio, cádmio e mercúrio, esses elementos podem alterar a composição química do solo, reduzindo sua fertilidade e tornando-o inadequado para o cultivo e a vegetação nativa. Conforme observa Robertson (2010), o risco de desastres ecológicos também é uma preocupação constante, já que o rompimento de barragens de rejeito pode provocar a destruição de habitats, erosão severa, e até a extinção de espécies locais.

### 2.3.2 Tecnologia *Tailings Dry Backfill*

A utilização de novas tecnologias, como a *TDB*, tem revolucionado a gestão de rejeitos na mineração de bauxita. Essa tecnologia envolve a desidratação dos rejeitos de mineração, reduzindo seu teor de umidade para criar uma massa semissólida, conhecida como "*dry stack*" (pilha seca). Esse material é então compactado e utilizado para preencher cavidades subterrâneas ou depressões do terreno em áreas mineradas previamente, eliminando a necessidade de grandes barragens de rejeitos e reduzindo o risco de rompimentos catastróficos, essa técnica

elimina a necessidade de barragens permanentes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a segurança operacional (IBRAM, 2020; HYDRO, 2020; DAVIES et al., 2011).

A TDB se destaca pela eficiência na recuperação de água. Durante o processo de desidratação, grande parte da água utilizada na mineração é recuperada, podendo ser reutilizada nas operações subsequentes. Isso é especialmente vantajoso em regiões com escassez de recursos hídricos, onde a preservação da água é essencial. Além disso, a tecnologia diminui a formação de lagoas de decantação e facilita o manuseio dos materiais, reduzindo custos e otimizando o processo (CASTILHO et al., 2020).

A adoção da tecnologia TDB não apenas aprimora a segurança operacional das minas, mas também promove uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Em tempos de crescente preocupação com a escassez de água, especialmente em regiões áridas, essa tecnologia se destaca como uma solução inteligente e sustentável. Ao maximizar a recuperação de água do processo de desidratação dos rejeitos, as operações de mineração não só preservam esse recurso fundamental, mas também reduzem os custos operacionais associados ao tratamento e armazenamento de grandes volumes de rejeitos líquidos (IBRAM, 2019; Alves, 2023)

Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a recuperação de água. Ao desidratar os rejeitos antes de seu descarte, é possível recuperar grande parte da água utilizada no processo de mineração, o que é especialmente vantajoso em regiões áridas onde a água é escassa. Além disso, a redução no volume de água nos rejeitos minimiza a formação de lagoas de decantação e facilita o manuseio e a disposição final dos materiais (HYDRO, 2020; Davies, 2011).

Além disso, a tecnologia *TDB* oferece uma abordagem proativa para a mitigação de riscos geotécnicos. A compactação dos rejeitos secos cria estruturas mais robustas e menos suscetíveis a deslizamentos, o que é particularmente importante em áreas com alta atividade sísmica ou topografia irregular. Ao eliminar a necessidade de grandes barragens de rejeitos, as mineradoras podem reduzir significativamente o potencial de desastres ambientais, protegendo tanto o meio ambiente quanto as comunidades locais próximas às operações de mineração.

A aplicação da *TDB* também contribui para a estabilidade geotécnica das estruturas de disposição de rejeitos, com menos água presente, os rejeitos tornam-se mais densos e estáveis, permitindo a construção de pilhas secas de rejeitos (*dry*

*stacks*) que ocupam menos espaço e são menos suscetíveis a processos de liquefação e deslizamentos, as características fazem da tecnologia uma opção mais segura e ambientalmente amigável para a gestão de rejeitos (Davies et al., 2010).

Outro aspecto relevante da *TDB* é sua contribuição para a reabilitação ambiental das áreas mineradas. A possibilidade de iniciar o fechamento progressivo das minas durante a própria operação representa uma vantagem econômica significativa, pois permite a recuperação gradual da paisagem, evitando a necessidade de investimentos massivos ao final da vida útil da mina. Isso não apenas acelera o processo de revegetação e recuperação do ecossistema local, mas também reforça o compromisso da empresa com práticas de mineração sustentáveis e responsáveis (Alves, 2023; Pantoja, 2021).

#### 2.3.2.1 Outras alternativas de destinação: Aproveitamento de Lama Vermelha e Rejeitos para Produção de Tijolos

O aproveitamento da lama vermelha e rejeitos da mineração, especialmente na extração da bauxita, está sendo explorado como uma solução sustentável para a produção de materiais de construção, como tijolos e blocos estruturais. Um estudo apresentado no 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica (2010) destaca o uso de lama vermelha, um subproduto da indústria de alumina, em misturas com argila para fabricar blocos estruturais. O objetivo é reduzir o descarte de resíduos em aterros e oferecer alternativas para a construção civil. Apesar de desafios técnicos, como a alta viscosidade da mistura, os blocos produzidos atenderam aos padrões de resistência exigidos pelas normas da ABNT, mostrando viabilidade para uso em construções. Essa solução é promissora tanto para o reaproveitamento de rejeitos quanto para a redução de custos na construção civil. (Souza et al., 2010).

A Figura 2 a seguir mostra como os blocos ficam no resultado final já no formato ideal para seu uso.

**Figura 2:** Blocos Estruturais

Fonte: Souza et al. (2010)

A análise dimensional é essencial para garantir que o tijolo esteja dentro dos padrões exigidos pela NBR 8492 (2012), que define os parâmetros de resistência e dimensões de tijolos de solo-cimento. Essa precisão nas medições assegura a uniformidade dos produtos e a conformidade com as normas de qualidade aplicáveis à construção civil. Conforme apresentada por meio da Figura 3.

**Figura 3:** Estrutura do Bloco de acordo com a NBR 8492 (2012).

Fonte: Barros (2023)

Segundo Barros (2023), a substituição parcial do solo por lama de alto-forno na produção de tijolos de solo-cimento é uma alternativa viável, reaproveitando resíduos e reduzindo o uso de matéria-prima virgem. Já o estudo de Jesus et al. (2017) identificou que a lama de alto-forno tem composição semelhante a lama vermelha, com potencial para uso na construção civil, apesar de desafios técnicos relacionados à reologia e estabilidade dimensional.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), A fabricação de tijolos de solo-cimento com substituição parcial de materiais convencionais por resíduos pode reduzir o impacto ambiental da mineração, diminuindo a necessidade de áreas de descarte. O uso desses resíduos em larga escala também diminui a extração de solos e recursos naturais, promovendo um ciclo produtivo mais sustentável.

O Departamento Nacional de Produção Mineral (2017) destaca que o estado do Pará, onde se concentra a maior parte da produção de bauxita no Brasil, enfrenta graves problemas relacionados ao descarte de rejeitos da mineração, a reutilização de resíduos como a lama vermelha é vista como uma solução eficiente para mitigar os impactos ambientais associados à mineração, como a contaminação do solo e da água. A confecção de tijolos com esses resíduos pode, portanto, contribuir diretamente para a redução desses impactos, promovendo uma economia circular.

Jesus et al. (2017) indicam que a lama vermelha, assim como a lama de alto-forno, possui características que afetam sua reologia, tornando o processo de extrusão mais complexo. Além disso, o excesso de óxidos de ferro pode interferir na plasticidade da mistura, exigindo ajustes finos no processo de fabricação para evitar problemas como trincas e deformações nos tijolos.

Segundo Alves et al. (2015), o reaproveitamento de resíduos, como o corte de granito, enfrenta desafios em relação à resistência e durabilidade. No caso da lama vermelha, ajustes no processo de mistura e extrusão são necessários para que os tijolos atendam às normas técnicas, como a NBR 8492 (2012). O estudo também ressalta que o uso de resíduos industriais pode reduzir os custos de produção de materiais de construção, tornando os tijolos mais acessíveis para construtoras e consumidores.

O Departamento Nacional de Produção Mineral (2017) destaca que a reciclagem de resíduos, como a lama vermelha, pode gerar empregos e impulsionar o desenvolvimento econômico em regiões mineradoras como o Pará. Projetos de pesquisa, como o de substituição de solo por lama de alto-forno, mostram que é possível produzir tijolos com características adequadas para construções de pequeno e médio porte, abrindo caminho para o uso da lama vermelha de forma semelhante. Jesus et al. (2017) exemplifica com a fabricação de blocos estruturais a partir de lama de alto-forno, comprovando sua viabilidade para construções civis.

### 3 METODOLOGIA

O trabalho se desenvolveu com base no estudo qualitativo e analítico, pois a pesquisa foi identificada pela coleta de dados descritivos e não numéricos, se deu pela análise de documentos fidedignos, com foco na obtenção da compreensão técnica e detalhada da tecnologia estudada. A coleta dos dados foi analisada pela técnica interpretativa, sob a análise do discurso e da teoria fundamentada (Castellani Filho, 1992).

A revisão integrativa literária foi escolhida devido à sua capacidade de sintetizar múltiplos estudos prévios, permitindo uma visão detalhada sobre métodos convencionais de disposição de rejeito e o estado atual da tecnologia *TDB* na mineração.

O estudo qualitativo e analítico permitiu uma compreensão profunda dos aspectos técnicos, operacionais e ambientais da tecnologia *TDB* de rejeitos de bauxita. A coleta de dados descritivos e não numéricos é essencial para capturar nuances e detalhes que os métodos quantitativos podem não revelar. A análise interpretativa foi conduzida com rigor, garantindo que as interpretações fossem consistentes e bem fundamentadas.

Para Gil (2011), as pesquisas se fundamentam na intenção de ajudar a desenvoltura de assuntos com relevância para auxiliar a construção de futuros pesquisadores que tenham o mesmo foco:

As pesquisas exploratórias são desenvolvidas com o objetivo de proporcionar visão geral, de tipo aproximativo, acerca de determinado fato. Os tipos de pesquisas descritivas, juntamente com as exploratórias, são as mais utilizadas por pesquisadores sociais que estejam preocupando-se com a atuação prática dos indivíduos. (GIL 2011, p. 27)

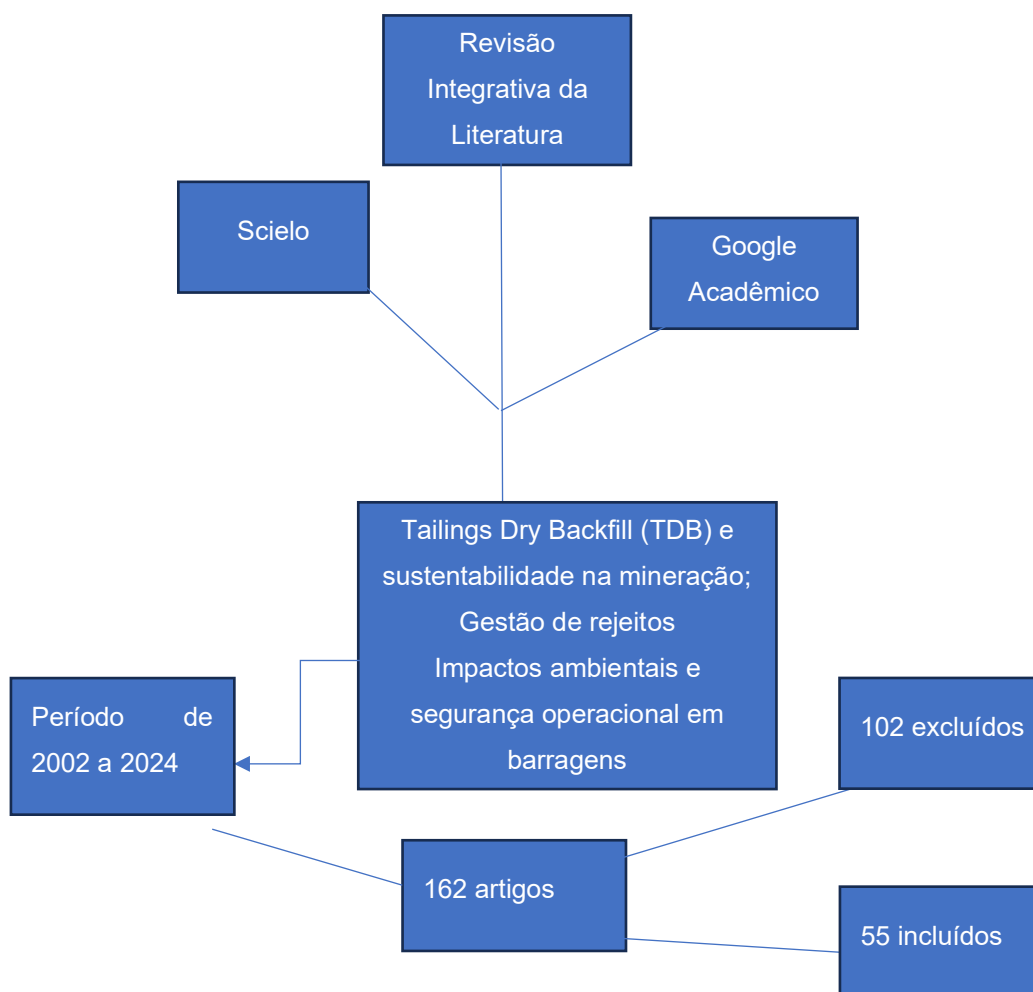
Ao adotar uma abordagem exploratória, este estudo busca não apenas entender a tecnologia *TDB*, mas também fornecer insights que possam guiar futuras pesquisas e aplicações práticas na área de mineração. A combinação de pesquisa descritiva e exploratória é particularmente adequada para temas inovadores, onde a compreensão inicial e ampla do fenômeno é crucial.

A análise comparativa entre a tecnologia *TDB* e os métodos convencionais de disposição de rejeitos de mineração permite uma avaliação abrangente das vantagens e desafios de cada abordagem. Considerações técnicas, operacionais e ambientais

foram meticulosamente examinadas para fornecer uma visão completa e equilibrada das implicações práticas da adoção da nova tecnologia. Essa análise não apenas destaca as inovações, mas também identifica áreas onde melhorias adicionais podem ser necessárias.

Foram priorizados estudos que abordam diretamente a temática da gestão de rejeitos de mineração, com ênfase em rejeitos de bauxita, bem como artigos que tratam da segurança de barragens, impactos ambientais e inovação tecnológica no setor mineral. Os documentos escolhidos incluem pesquisas acadêmicas, relatórios técnicos, estudos de caso, como também diretrizes de órgãos governamentais e publicações de instituições de relevância internacional.

**Figura 4: Delineamento dos Artigos**



Fonte: Da Autora (2024)

Dessa forma, a presente revisão busca não apenas sintetizar o conhecimento existente, mas também destacar lacunas na literatura e apontar direções futuras para pesquisas e práticas inovadoras no setor de mineração.

A escolha dos estudos foi orientada por critérios de relevância para o tema, abrangendo publicações que analisam os aspectos técnicos e operacionais da disposição de rejeitos na mineração, com foco na comparação entre métodos tradicionais e o TDB, foram considerados artigos que abordassem questões de segurança ambiental, eficiência operacional, impactos econômicos, e sustentabilidade.

O critério de seleção e inclusão dos artigos para esta discussão foi realizado a partir de uma leitura inicial dos títulos, identificando aqueles que estavam diretamente relacionados ao tema da aplicabilidade da tecnologia TDB no processo industrial de diferentes minerais. Em seguida, procedeu-se com a leitura dos resumos dos artigos selecionados, para refinar ainda mais o foco naqueles que apresentavam uma abordagem relevante e pertinente aos aspectos técnicos e operacionais dessa tecnologia. Por fim, foi realizada a leitura integral dos textos que restaram, selecionando-se, assim, os artigos que mais contribuíam para o aprofundamento do tema e que trouxessem dados e análises significativos para a construção desta discussão.

Trata-se de 10 artigos, publicados entre 2002 e 2018, que buscam compreender os desafios técnicos e operacionais enfrentados na disposição de rejeitos de diferentes minerais, abordando aspectos como a reatividade dos rejeitos cimentados, a influência de fatores estruturais e químicos, a importância da reologia, e as estratégias de hidratação e compactação no contexto da mineração, conforme apresentado por meio do Quadro 4 em anexo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos tópicos a seguir, foi analisada a tecnologia Tailings Dry Backfill (TDB) sob três perspectivas principais: sustentabilidade ambiental, segurança técnica e operacional, e aplicabilidade em outros contextos minerais. Primeiro, a discussão abordará como o TDB pode contribuir para uma gestão mais sustentável dos rejeitos, minimizando riscos de contaminação e melhorando a eficiência ambiental. Em seguida, são examinados os aspectos técnicos e operacionais da tecnologia, incluindo sua segurança em comparação com métodos tradicionais de disposição, como as barragens de rejeitos.

Por fim, será explorada a possibilidade de aplicar o TDB a outros processos minerais, levando em conta os desafios e adaptações necessários para diferentes tipos de extração e características dos rejeitos. Essa abordagem permitirá uma visão abrangente dos benefícios e limitações do TDB em diferentes cenários de mineração.

### 4.1 Funcionamento do TDB: Passo a Passo

De acordo com Alves (2023), o TDB começa com a preparação do local de disposição. Primeiro passo do processo *Tailings Dry Backfill* (TDB) envolve a preparação de áreas específicas, chamadas Platôs, para o depósito de rejeitos de mineração. Essas áreas são cuidadosamente escolhidas e preparadas para garantir que o material seja depositado de forma segura, eliminando a necessidade de construir barragens de rejeitos. Na operação da Hydro Paragominas, por exemplo, o sistema inclui quatro reservatórios para rejeitos e bacias de clarificação, o que facilita o reaproveitamento de água no processo.

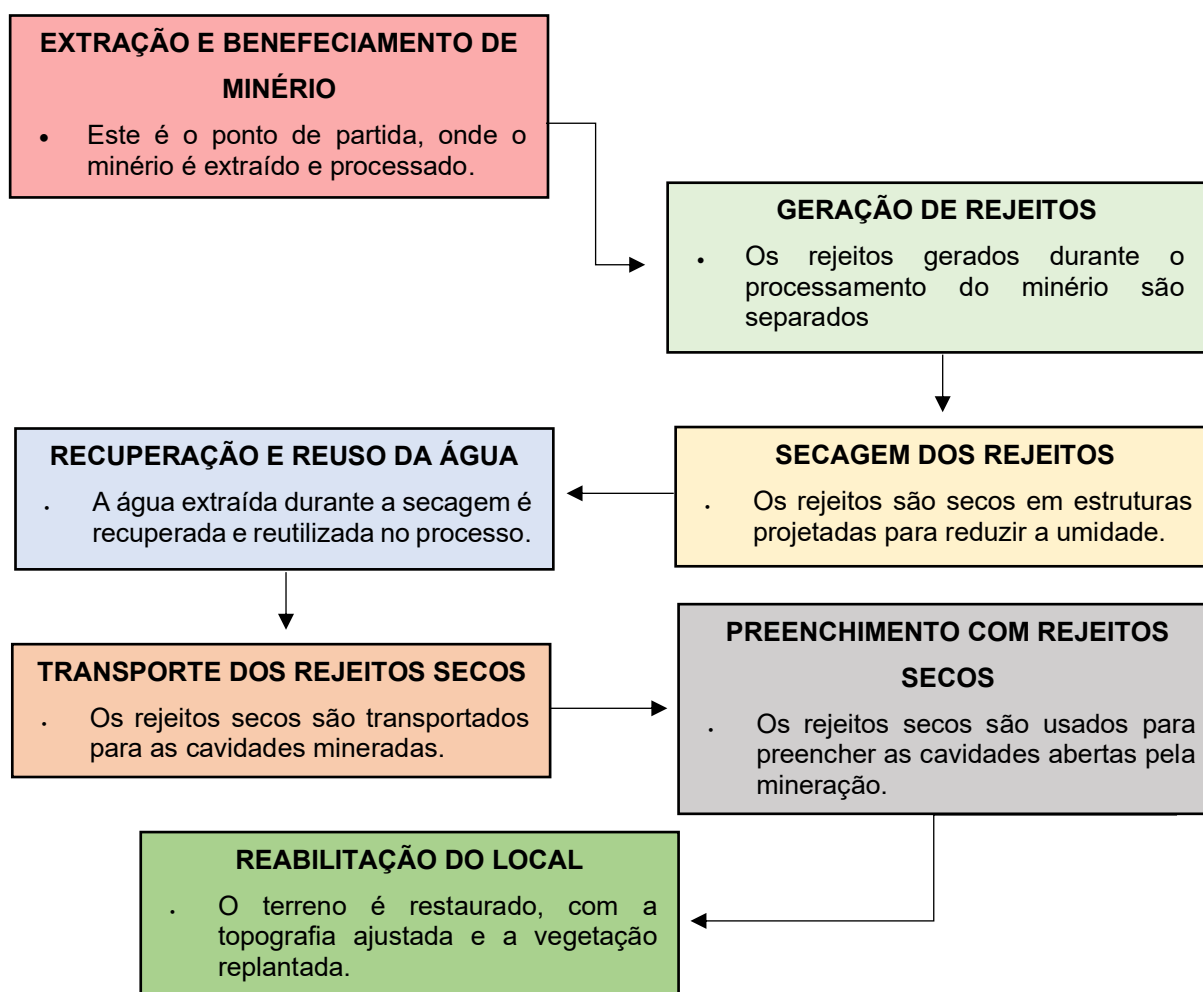
Em seguida ocorre o processo de secagem natural dos rejeitos, onde a água contida no material evapora devido à exposição ao sol e ao vento. Esse processo é acompanhado para garantir que o rejeito atinja o teor de sólidos necessário para o próximo passo. (Alves, 2023; Castilho, 2020).

Quando os rejeitos já estão secos, eles são transportados das áreas de secagem para as cavas mineradas utilizando caminhões. Esse transporte é planejado de forma a otimizar a operação e minimizar impactos ambientais, considerando a distância entre os locais de secagem e as cavas. Na Hydro Paragominas, essa distância é de aproximadamente 5 km. (Alves, 2023).

Desta forma, o rejeito seco é então usado para preencher as cavas abertas após a extração de bauxita. Esse processo de preenchimento faz parte da estratégia de reabilitação ambiental da área, pois, após o depósito dos rejeitos, o material estéril e o solo orgânico previamente retirado é repostos sobre eles. Isso prepara o terreno para a etapa de revegetação e restauração ecológica (Pantoja, 2021; Alves, 2023).

A água utilizada no beneficiamento do minério é coletada e armazenada em bacias especialmente projetadas para isso. Depois, essa água é reciclada e reutilizada em diferentes etapas da operação, reduzindo significativamente a necessidade de captação de novos recursos hídricos, o que torna o processo mais sustentável. (Alves, 2023). A Figura 4 apresenta um fluxograma que resume as etapas do processo TDB, destacando desde a disposição e secagem dos rejeitos até o retorno dos materiais às cavas, integrando a gestão da água e o uso sustentável dos recursos.

**Figura 5:** Fluxograma - Processo de disposição com TDB



O fluxograma na Figura 4 oferece uma representação clara e resumida do processo TDB, ilustrando as principais etapas, desde a preparação das áreas de disposição até o retorno dos rejeitos às cavas. Ele também evidencia a gestão integrada da água no beneficiamento do minério, destacando o ciclo de utilização, armazenamento e reutilização, o que contribui para a sustentabilidade do método.

O funcionamento do processo Tailings Dry Backfill (TDB) é descrito em etapas claras que demonstram uma abordagem técnica e estratégica para o gerenciamento de rejeitos de mineração. O processo inicia-se com a preparação de áreas específicas, denominadas Platôs, cuidadosamente planejadas para garantir a segurança e eficiência na disposição dos rejeitos, sem a necessidade de barragens. Após a disposição inicial, ocorre a secagem natural dos rejeitos, um processo que utiliza fatores ambientais, como o sol e o vento, para reduzir a umidade do material até atingir o teor necessário para o próximo estágio.

Posteriormente, os rejeitos secos são transportados para cavas mineradas utilizando caminhões, um planejamento logístico que considera distâncias e otimiza operações. Essa etapa é fundamental, pois conecta o processo de disposição dos rejeitos à reabilitação ambiental, já que as cavas, após serem preenchidas, recebem a reposição de material estéril e solo orgânico para restabelecer condições adequadas à revegetação e restauração ecológica.

Outro ponto crucial é o ciclo da água utilizado no beneficiamento do minério. A captação, armazenamento em bacias projetadas e a reciclagem contínua desse recurso reduzem a necessidade de captação externa, tornando o processo mais eficiente e sustentável. Essa integração entre gestão de rejeitos e uso de recursos naturais revela um sistema planejado para minimizar impactos ambientais enquanto reabilita áreas mineradas.

O uso de fluxogramas, como mencionado, é um recurso visual que facilita a compreensão do processo ao sintetizar cada etapa em uma representação gráfica. Assim, o processo TDB integra operações técnicas e ambientais de forma eficiente, promovendo um modelo de gestão voltado à sustentabilidade e ao equilíbrio entre exploração mineral e preservação ambiental.

#### **4.2 Análise da sustentabilidade ambiental da tecnologia *Tailings Dry Backfill***

Segundo Aldhafeeri et al. (2017) a disposição de rejeitos na mineração é um desafio crítico para a sustentabilidade ambiental, principalmente quando se utiliza métodos convencionais, como as barragens de rejeitos. A presença de sulfatos em alguns tipos de rejeitos pode alterar significativamente a reatividade do material cimentado, aumentando o risco de lixiviação de substâncias para o solo e corpos d'água. Em contraste, o uso da tecnologia *Tailings Dry Backfill* (TDB) minimiza esses riscos, pois promove a secagem e o confinamento de rejeitos secos nas cavas de mineração, reduzindo a mobilidade de poluentes.

Bolto et al. (2007) explicam que o uso de polieletrólitos orgânicos no tratamento de água pode ser uma estratégia eficaz para minimizar a contaminação de rejeitos líquidos. No contexto da tecnologia TDB, a necessidade de tratamento de água é significativamente reduzida, pois o método evita o acúmulo de rejeitos líquidos, diminuindo o impacto ambiental e os custos operacionais associados ao tratamento de efluentes.

De acordo com Azevedo et al. (2018) a tecnologia de preenchimento a seco dos rejeitos, conhecida como *Tailings Dry Backfill* (TDB), apresenta diversas vantagens em comparação com os métodos tradicionais de disposição de rejeitos. Uma das principais é que não há a necessidade de realizar ampliações ou alteamentos das estruturas, o que reduz significativamente a ocupação de grandes áreas. Além disso, como não há necessidade de expansão de bacias, os impactos sobre a vegetação local são minimizados. Outra grande vantagem do TDB é a maior eficiência no reaproveitamento de água, o que contribui para uma gestão hídrica mais sustentável. No momento do fechamento da mina, a descaracterização do depósito de rejeitos torna-se mais simples e econômica, permitindo a adequação da topografia para posterior recuperação ambiental, como o reflorestamento. Por fim, diferentemente das barragens convencionais, que exigem projetos complexos para garantir a segurança geotécnica, o TDB elimina esses riscos estruturais, uma vez que a barragem deixa de existir, facilitando o processo de fechamento da mina (Alves, 2023).

Conforme Aldhafeeri et al. (2017), a segurança técnica de qualquer método de disposição de rejeitos depende significativamente dos materiais utilizados e da forma como são manipulados durante a construção e operação, no caso da tecnologia TDB,

a disposição de rejeitos secos nas cavas de mineração elimina a necessidade de grandes estruturas de contenção, como as barragens de rejeitos, que são altamente suscetíveis a falhas estruturais, a ausência dessas barragens reduz os riscos associados ao alteamento, uma técnica usada para aumentar a capacidade das barragens que frequentemente envolve processos difíceis e caros.

#### 4.2.1 Questões Ambientais e Reaproveitamento: Contribuições do TDB

De acordo com Alves (2023), uma das principais vantagens do TDB é o reaproveitamento de insumos, como os rejeitos gerados pela mineração, que são estabilizados e reutilizados no preenchimento das cavidades da mina, ao invés de serem descartados em barragens, este reaproveitamento reduz a necessidade de novas áreas de deposição e ajuda a diminuir o passivo ambiental das mineradoras, uma vez que os rejeitos, que antes eram considerados resíduos, passam a ser utilizados de forma produtiva no processo de recomposição do terreno.

Segundo Benzaazoua et al. (2002), o TDB minimiza o risco ambiental ao eliminar a necessidade de barragens de rejeitos, que representam potenciais ameaças ambientais, como o rompimento e a contaminação de solo e água, o uso do TDB previne o acúmulo de grandes volumes de rejeitos líquidos e possibilita o controle mais eficiente dos materiais, contribuindo para a segurança ambiental.

Conforme apontado por Boger (2009), o TDB requer um volume muito menor de água em comparação com as práticas convencionais de disposição de rejeitos líquidos, já que os rejeitos são desidratados antes de serem reaproveitados no preenchimento das cavidades, esse aspecto é crucial em um contexto de crescente escassez de recursos hídricos, tornando o processo mais eficiente em termos de consumo de água.

Bullard et al. (2015) destacam que a reintrodução dos rejeitos secos nas minas contribui para um ciclo de reaproveitamento, onde materiais que anteriormente eram um problema ambiental passam a ser parte de uma solução sustentável, isso reduz a necessidade de extração de novos insumos e melhora a eficiência do processo produtivo da mineração.

Almeida e Wanderley (2019) destacam que a eliminação de barragens e a adoção de tecnologias que envolvem o reaproveitamento de insumos contribuem para uma pegada de carbono menor, uma vez que as mineradoras não precisam construir

novas infraestruturas para disposição de rejeitos, a redução de atividades que envolvem transporte e manutenção de barragens também contribui para uma operação mais eficiente em termos de emissões.

Como Alves (2023) e Benzaazoua et al. (2002) apontam, a adoção dessa tecnologia permite que as mineradoras operem de forma mais sustentável, atendendo às regulamentações ambientais e contribuindo para a preservação dos recursos naturais, portanto, o TDB oferece soluções abrangentes para a gestão dos rejeitos de mineração, com benefícios que se estendem à redução da demanda por barragens, à economia de água, à reciclagem de materiais e à diminuição das emissões de carbono.

O TDB apresenta importantes benefícios ambientais ao transformar rejeitos em insumos reutilizáveis no preenchimento de cavidades das minas, reduzindo a necessidade de barragens e os riscos associados ao seu rompimento e à contaminação ambiental. Além disso, ao empregar rejeitos desidratados, o TDB diminui significativamente o consumo de água, um recurso cada vez mais escasso, promovendo operações mais sustentáveis. Essa tecnologia também contribui para a redução da pegada de carbono, eliminando a necessidade de construir novas infraestruturas de disposição de rejeitos e reduzindo o transporte desses materiais. Assim, o TDB viabiliza uma mineração mais responsável, que preserva os recursos naturais e atende às regulamentações ambientais, consolidando-se como uma solução estratégica para minimizar os impactos ambientais da atividade mineradora.

#### **4.3 Análise dos aspectos de segurança técnica e operacional da tecnologia TDB**

De acordo com Chen et al. (2017), a dinâmica operacional do Tailings Dry Backfill (TDB) é menos dependente de infraestrutura intensiva em comparação com os métodos convencionais de disposição de rejeitos, sendo mais adaptável a diferentes cenários de mineração, a disposição de rejeitos secos diretamente nas cavas permite uma adaptação mais rápida e eficiente a mudanças nas condições operacionais, enquanto as barragens de rejeitos requerem processos complexos de adaptação, monitoramento e manutenção contínua para garantir a segurança e estabilidade geotécnica.

Boger (2009), em seu estudo sobre reologia e indústrias de recursos, ressalta que a manipulação adequada da viscosidade dos rejeitos é essencial para garantir a sua disposição segura e sustentável. A tecnologia TDB, ao envolver rejeitos secos e compactados, apresenta vantagens ao permitir um manejo mais eficiente da viscosidade dos materiais, reduzindo o risco de deslizamentos e rompimentos, comuns em barragens de rejeitos.

Na perspectiva de Bullard et al. (2011), a segurança operacional dos métodos de disposição de rejeitos está diretamente ligada ao controle da hidratação do cimento e à manutenção de suas propriedades mecânicas ao longo do tempo. A tecnologia TDB, ao permitir um controle mais preciso sobre o processo de hidratação dos materiais cimentados, proporciona uma operação mais segura e previsível. Em contraste, as barragens de rejeitos enfrentam desafios contínuos relacionados ao controle da água, que podem afetar a estabilidade e segurança das estruturas.

Nos estudos de Benzaazoua et al. (2002) se discutem os fatores químicos que influenciam o desempenho do *backfill* de pasta sulfídrica em minas, enfatizando a necessidade de controle químico adequado para evitar a degradação dos materiais de enchimento, a aplicação do TDB atende a esses critérios, pois permite um controle mais rígido sobre os componentes químicos dos rejeitos, reduzindo a chance de reações adversas que podem comprometer a estabilidade do depósito de rejeitos.

Os apontamentos feitos por Bolto et al. (2007) indicam que, em termos operacionais, o tratamento de água é um componente essencial nas barragens de rejeitos convencionais para garantir a segurança e evitar contaminações, no TDB, o tratamento de água é substancialmente reduzido, pois o método minimiza o contato dos rejeitos com a água, isso não apenas simplifica as operações, mas também reduz os custos associados ao tratamento de grandes volumes de efluentes e diminui o impacto ambiental do processo.

Nas palavras de Boger (2009), a reologia dos rejeitos, ou seja, o estudo da sua deformação e fluxo, é um aspecto operacional crucial na disposição de rejeitos, portanto a tecnologia TDB, ao trabalhar com rejeitos secos, apresenta uma vantagem operacional significativa, pois reduz a complexidade e os custos associados ao transporte e manuseio de materiais líquidos. As barragens, por outro lado, exigem sistemas de bombeamento e drenagem contínuos para manter a estabilidade, o que implica em maiores custos operacionais e riscos associados a falhas mecânicas.

Os estudos de Bellmann et al. (2015) observam que as taxas de dissolução durante a hidratação de materiais cimentados, como os utilizados no TDB, são fundamentais para garantir a segurança estrutural dos depósitos de rejeitos. Diferentemente das barragens convencionais, onde a água desempenha um papel crítico na estabilidade das estruturas, o TDB reduz drasticamente o risco de falhas relacionadas à infiltração de água, a secagem dos rejeitos e seu confinamento seguro nas cavas proporcionam maior controle sobre os fatores que influenciam a integridade dos materiais depositados.

Nas considerações de Bullard et al. (2015), a gestão das forças motrizes que afetam a cinética da hidratação é essencial para a segurança a longo prazo dos rejeitos cimentados. Com o TDB, a operação é facilitada pela capacidade de ajustar rapidamente as condições de disposição para garantir a segurança e estabilidade do material depositado, nesse sentido, essa flexibilidade operacional é menos presente nas barragens, onde alterações nas condições de disposição podem ser complicadas e onerosas.

Os apontamentos de Cao et al. (2018) analisam a influência de fatores estruturais na resistência à compressão de materiais de enchimento cimentados, observando que o design e a execução corretos são fundamentais para a segurança. O TDB permite uma maior flexibilidade na escolha dos métodos construtivos, proporcionando ajustes rápidos nas técnicas de disposição, conforme necessário, para garantir uma segurança operacional superior em comparação com os métodos tradicionais.

De acordo com Azevedo et al. (2018), a utilização de novos materiais, como aditivos cimentícios, pode aprimorar a resistência mecânica dos rejeitos dispostos, a tecnologia TDB permite incorporar melhorias construtivas diretamente nos rejeitos secos antes da disposição, resultando em maior estabilidade estrutural ao longo do tempo, e os custos associados à construção e manutenção de barragens acabam por ser significativamente reduzidos com o uso do TDB, uma vez que elimina a necessidade de investir em estruturas de contenção complexas e em seu constante monitoramento.

Comparando os aspectos de segurança do trabalho, verifica-se que o TDB oferece um ambiente de trabalho mais seguro em comparação com as barragens convencionais. Como as operações com o TDB envolvem menos contato com rejeitos líquidos e reduzem significativamente o risco de deslizamentos ou rupturas, há uma

menor exposição dos trabalhadores a perigos diretos, como afogamentos, quedas e contaminação química. Além disso, a eliminação da necessidade de alteamento das barragens, uma atividade altamente arriscada e complexa, contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e menos sujeito a acidentes.

O método TDB desponta como uma alternativa eficiente para a disposição de rejeitos na mineração, destacando-se por sua flexibilidade operacional e menor dependência de estruturas complexas. Diferente das barragens tradicionais, o TDB permite uma adaptação mais ágil às condições de operação, além de reduzir significativamente os riscos associados à estabilidade geotécnica. No entanto, é fundamental avaliar criticamente suas exigências e limitações para uma implementação eficaz.

Um dos grandes benefícios do TDB é o controle aprimorado sobre os materiais, como a viscosidade dos rejeitos e a hidratação de componentes cimentados. Isso proporciona maior segurança operacional e reduz a probabilidade de deslizamentos ou falhas estruturais. Contudo, essas vantagens demandam um monitoramento contínuo e rigoroso para assegurar que os parâmetros técnicos sejam devidamente atendidos.

A redução no uso de água é outro ponto forte do TDB, minimizando a necessidade de tratamento de efluentes e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Apesar disso, o método requer planejamento detalhado na preparação das áreas de disposição e no transporte dos rejeitos secos, etapas que podem implicar em custos iniciais elevados. Empresas menores, com limitações de recursos e tecnologia, podem enfrentar desafios adicionais na adoção dessa abordagem.

Outro aspecto importante é a flexibilidade oferecida pelo TDB na escolha e execução das técnicas de disposição. Essa característica permite ajustes rápidos diante de alterações nas condições operacionais, o que é um diferencial em relação aos métodos tradicionais. No entanto, essa flexibilidade exige equipes altamente capacitadas e uma gestão eficiente para evitar falhas durante o processo.

Do ponto de vista ambiental, o TDB reduz os riscos relacionados à infiltração de água nos rejeitos, contribuindo para uma maior estabilidade dos depósitos ao longo do tempo. Ainda assim, o sucesso dessa estratégia depende de estudos detalhados sobre as propriedades dos materiais e do cumprimento rigoroso das etapas de compactação e secagem.

Em síntese, o TDB representa uma evolução significativa nos métodos de disposição de rejeitos, integrando sustentabilidade e segurança. No entanto, sua aplicação deve ser acompanhada de um planejamento estratégico cuidadoso, que considere tanto os benefícios quanto os desafios técnicos e econômicos. Somente com essa abordagem será possível maximizar os ganhos e minimizar os riscos associados à sua implementação.

A análise técnica e jurídica do Tailings Dry Backfill (TDB) reforça seu potencial como uma solução alinhada às demandas de segurança, sustentabilidade e conformidade regulatória na mineração. Sob uma perspectiva técnica, o TDB demonstra vantagens operacionais e ambientais evidentes, mas sua implementação exige atenção minuciosa aos parâmetros de projeto, monitoramento e controle de qualidade, garantindo que todas as etapas sejam realizadas de forma eficiente e segura.

Do ponto de vista técnico, a aplicação do TDB exige um planejamento detalhado para a preparação das áreas de disposição, incluindo estudos geotécnicos para avaliar a capacidade de suporte do solo, a compactação dos rejeitos secos e a definição de parâmetros precisos para a mistura cimentícia, caso seja utilizada. A redução da dependência de água minimiza os riscos de infiltração e contaminação, mas demanda maior controle sobre o transporte e manuseio dos rejeitos, especialmente em cenários de grande escala.

Além disso, a tecnologia permite maior flexibilidade operacional, adaptando-se rapidamente a mudanças nas condições de mineração e atendendo a requisitos específicos de estabilidade. No entanto, essas vantagens exigem investimentos iniciais significativos, capacitação das equipes e uma infraestrutura adequada para transporte e disposição.

No campo jurídico, a adoção do TDB atende às exigências cada vez mais rigorosas das legislações ambientais e de segurança no trabalho. A substituição de barragens convencionais por depósitos secos está alinhada com o princípio da precaução, consagrado em diversos instrumentos legais, como a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981) e o Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967). Essas normas estabelecem diretrizes para prevenir danos ambientais e garantir a integridade das operações mineradoras.

Além disso, o TDB pode contribuir para o cumprimento das obrigações estabelecidas pela Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos

Sólidos, ao promover a reutilização de rejeitos de forma sustentável. No âmbito trabalhista, a tecnologia está em conformidade com a Norma Regulamentadora nº 22 (NR-22), que estabelece requisitos de segurança para atividades mineradoras, reduzindo os riscos ocupacionais associados às barragens tradicionais.

Os aspectos jurídicos relacionados à viabilidade do TDB também abrangem a necessidade de licenciamento ambiental, que deve ser conduzido de acordo com os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 237/1997. Estudos de impacto ambiental (EIA) e relatórios de impacto ambiental (RIMA) são fundamentais para assegurar que a disposição dos rejeitos secos não comprometa a biodiversidade ou os recursos hídricos locais.

A integração de abordagens técnicas e jurídicas na implementação do TDB é essencial para maximizar seus benefícios e garantir sua conformidade com as exigências regulatórias. Empresas mineradoras que adotam o TDB não apenas demonstram compromisso com a sustentabilidade e a segurança, mas também se posicionam de forma estratégica para atender às demandas do mercado e das comunidades impactadas.

O sucesso do TDB, no entanto, depende de uma abordagem holística, que considere a capacitação técnica, a transparência no processo de licenciamento e o cumprimento rigoroso das normas aplicáveis. Dessa forma, o TDB pode consolidar-se como uma alternativa viável e responsável para a disposição de rejeitos na mineração moderna.

#### **4.4 Análise de aplicabilidade da tecnologia *Tailings Dry Backfill* – TDB no processo industrial de outros minerais**

Segundo Azevedo et al. (2018), a extração e disposição de rejeitos em diferentes processos minerais envolvem variadas técnicas e desafios que dependem das características físicas e químicas dos minerais extraídos. No caso da bauxita, a tecnologia TDB mostrou-se eficaz na disposição de rejeitos secos nas cavas de mineração. Ao analisar outros minerais, como o cobre, o ferro e o carvão, é crucial entender as propriedades dos rejeitos gerados e a dinâmica do processo de extração para avaliar a viabilidade do uso do TDB.

Azevedo et al. (2018) enfatizam a importância de avaliar o comportamento de diferentes materiais na hidratação e nas propriedades mecânicas das pastas

cimentícias, um componente fundamental para entender a estabilidade dos rejeitos dispostos por métodos como o TDB. A introdução de materiais inovadores, como nano fios de carbetto de silício, sendo avaliada a viabilidade econômica pode melhorar a durabilidade e a resistência dos rejeitos cimentados, tornando a tecnologia TDB uma opção mais segura e sustentável em comparação com as barragens tradicionais.

Nas palavras de Chen et al. (2017), a aplicação do TDB em outros minerais dependerá da compatibilidade dos rejeitos com o método de secagem e confinamento utilizado. Em operações de extração de cobre, por exemplo, os rejeitos frequentemente contêm altos níveis de metais pesados e ácidos residuais, que podem apresentar desafios adicionais na secagem e disposição. No entanto, se os rejeitos puderem ser adequadamente neutralizados e secos, a disposição nas cavas poderia ser uma solução sustentável, reduzindo a necessidade de barragens de rejeitos e minimizando os impactos ambientais.

De acordo com Benzaazoua et al. (2002), os fatores químicos que influenciam o desempenho dos rejeitos devem ser considerados ao avaliar a aplicabilidade do TDB em outros contextos minerais. Para minérios de ferro, que geram grandes quantidades de rejeitos finos, a disposição de rejeitos secos pode ser vantajosa se houver condições adequadas de secagem e tratamento. O controle rigoroso da composição química e a capacidade de compactação dos rejeitos podem permitir que o TDB seja aplicado com sucesso, embora os custos e desafios técnicos de adaptação sejam diferentes daqueles observados na mineração de bauxita. Outro ponto importante a ser observado neste caso, é a dinâmica operacional das minas de ferro, devendo ser avaliada a viabilidade da disposição do rejeito em cavas inativas, por exemplo, ou outra dinâmica de disposição que se demonstre viável operacionalmente.

Segundo Boger (2009), a reologia dos rejeitos também desempenha um papel crucial na escolha do método de disposição. No caso do carvão mineral, os rejeitos possuem uma consistência que pode variar amplamente, dependendo do método de processamento. A tecnologia TDB poderia ser adaptada para depósitos de carvão, especialmente onde os rejeitos possuem baixo teor de umidade e podem ser facilmente compactados e estabilizados. A disposição de rejeitos secos nas cavas poderia, assim, minimizar o impacto sobre a paisagem e reduzir a necessidade de manutenção contínua de barragens de rejeitos.

Os apontamentos de Bullard et al. (2011) ressaltam que, para a aplicação bem-sucedida do TDB em outros minerais, é essencial garantir o controle da hidratação e

das propriedades mecânicas dos materiais cimentados. Minerais como o ouro, que frequentemente utilizam métodos de lixiviação, geram rejeitos com alto teor de água e potencial de contaminação. A adaptação do TDB para esses cenários exigiria um tratamento inicial para reduzir a umidade e o potencial de contaminação dos rejeitos, seguido pela disposição segura nas cavas, mitigando assim os impactos ambientais.

Na perspectiva de Aldhafeeri et al. (2017), a segurança técnica e operacional do TDB em outros minerais também dependerá da infraestrutura existente e da forma de extração do mineral. Por exemplo, na mineração de fosfato, onde os rejeitos são frequentemente dispostos em grandes pilhas, a implementação do TDB poderia exigir modificações significativas na infraestrutura de disposição e métodos de transporte. No entanto, em minas com cavas já abertas, a tecnologia poderia ser aplicada de forma mais direta, permitindo a reutilização das cavas para o depósito de rejeitos secos.

Conforme Cao et al. (2018), a resistência estrutural dos rejeitos compactados é um fator determinante para a viabilidade do TDB. Em processos como a extração de níquel e zinco, onde os rejeitos tendem a ser mais finos e contêm sulfetos, o TDB pode oferecer vantagens significativas ao reduzir o risco de geração de drenagem ácida e facilitar o manejo seguro e eficiente dos resíduos. No entanto, a necessidade de equipamentos especializados para secagem e transporte dos rejeitos secos deve ser considerada ao avaliar a aplicabilidade da tecnologia.

Os estudos de Bellmann et al. (2015) indicam que as taxas de hidratação e dissolução dos minerais podem variar amplamente, afetando a eficácia do TDB. Em minas de potássio, por exemplo, onde os rejeitos são altamente solúveis, a disposição de rejeitos secos pode apresentar desafios únicos em termos de controle de lixiviação. No entanto, com o uso de aditivos cimentícios e técnicas de compactação adequadas, a tecnologia TDB poderia ser adaptada para minimizar os riscos ambientais e garantir a segurança a longo prazo.

Segundo Bolto et al. (2007), o tratamento de água é um componente essencial na gestão de rejeitos em muitos tipos de mineração, como a de urânio. A utilização do TDB em contextos onde há risco de contaminação radioativa necessitaria de técnicas rigorosas de controle e contenção. No entanto, o método de disposição de rejeitos secos pode ser vantajoso se houver uma estratégia clara para controlar e monitorar a radioatividade dos materiais dispostos, reduzindo o risco de contaminação das águas subterrâneas.

Na análise de Bullard et al. (2015), a cinética da hidratação e as propriedades finais dos materiais de rejeito são cruciais para determinar a viabilidade do TDB. Minerais como o chumbo e o zinco, que geram resíduos potencialmente perigosos, poderiam se beneficiar de uma abordagem de disposição seca, desde que o controle do processo de hidratação dos rejeitos seja rigorosamente mantido. A estabilidade adicional proporcionada pelo TDB poderia ajudar a reduzir a necessidade de estruturas de contenção e o risco de exposição ambiental.

De acordo com Boger (2009), a implementação do TDB em operações de mineração de prata, que frequentemente utilizam técnicas de lixiviação com cianeto, precisaria considerar o tratamento prévio dos rejeitos para remover ou neutralizar os contaminantes. Embora o método de disposição seca ofereça vantagens em termos de segurança e controle ambiental, a adaptação do TDB em tais contextos exigiria investimentos adicionais em tecnologia de tratamento de resíduos e monitoramento contínuo.

Nas palavras de Chen et al. (2017), a aplicação do TDB em diferentes processos industriais deve ser cuidadosamente avaliada com base nas características específicas dos minerais extraídos, dos métodos de processamento e da dinâmica de disposição de rejeitos. A tecnologia TDB, hoje aplicada com sucesso na mineração de bauxita, mostra-se promissora para outros minerais, mas sua implementação dependerá de ajustes específicos para cada contexto, considerando a viabilidade técnica e econômica da disposição final de rejeitos nas cavas.

#### *4.4.1 Aplicabilidade da Tecnologia Tailings Dry Backfill: Desafios e Exemplos Práticos*

Atualmente, a disposição de rejeitos de mineração enfrenta diversos desafios técnicos e operacionais, que variam conforme o tipo de mineral extraído e as características específicas dos rejeitos. Segundo Chen et al. (2017), os métodos convencionais, como as barragens de rejeitos, são frequentemente associados a riscos significativos de rompimentos devido às falhas de estabilidade estrutural, especialmente durante eventos climáticos extremos. Esses rompimentos podem causar danos ambientais e sociais devastadores, como exemplificam os desastres ocorridos em Mariana e Brumadinho, no Brasil. Além disso, a gestão de rejeitos que contém substâncias tóxicas, como metais pesados e produtos químicos usados no

processamento (por exemplo, cianeto na mineração de ouro), apresenta desafios adicionais, uma vez que a infiltração de água e a drenagem ácida podem contaminar o solo e as águas subterrâneas (Benzaazoua et al., 2002).

De acordo com Boger (2009), a disposição de rejeitos também exige vastas áreas de terra, o que frequentemente resulta em impactos ambientais associados ao desmatamento, à perda de habitats naturais e ao impacto nas comunidades locais. A necessidade de espaço é um problema crescente em regiões densamente povoadas ou ambientalmente sensíveis. Além disso, a construção, monitoramento e manutenção de barragens de rejeitos são caros, especialmente quando são necessárias medidas adicionais de segurança e infraestrutura para evitar desastres. O alteamento contínuo das barragens, necessário para acomodar volumes crescentes de rejeitos, aumenta os riscos de falhas estruturais e os custos operacionais, além de tornar mais complexo e custoso o processo de descaracterização das estruturas, tornando a disposição convencional cada vez menos viável (Bullard et al., 2011).

Aldhafeeri et al. (2017) sugerem que a tecnologia Tailings Dry Backfill (TDB) é uma alternativa viável para mitigar muitos desses desafios. A disposição de rejeitos secos diretamente nas cavas de mineração elimina a necessidade de barragens de rejeitos, reduzindo significativamente o risco de rompimentos catastróficos. Rejeitos secos são mais estáveis e menos suscetíveis a falhas estruturais causadas por infiltração de água ou condições climáticas adversas.

Azevedo et al. (2018) destacam que o TDB promove um uso mais eficiente do terreno, permitindo que áreas já impactadas pela mineração (como cavas) sejam reutilizadas para a disposição de rejeitos, evitando a necessidade de novas áreas de terra e preservando ecossistemas naturais. A eliminação da construção e manutenção de barragens de rejeitos também resulta em economia de custos, pois reduz as despesas relacionadas ao monitoramento contínuo, alteamento e obras de infraestrutura complexas (Bellmann et al., 2015).

Chen et al. (2017) indicam que o TDB pode aumentar significativamente a segurança operacional. A disposição de rejeitos secos nas cavas reduz a exposição dos trabalhadores a condições perigosas, como o contato com rejeitos líquidos e a realização de atividades de alteamento em barragens, que são inerentemente arriscadas. Além disso, a maior estabilidade dos rejeitos secos reduz a necessidade de intervenções frequentes e manutenção complexa, simplificando as operações e melhorando a segurança geral das atividades de mineração.

A viabilidade do TDB para outros minerais depende das características dos rejeitos e das condições específicas de cada operação de mineração. Bullard et al. (2015) afirmam que, em operações de mineração de cobre, onde os rejeitos contêm altos níveis de metais pesados e ácidos residuais, a secagem e o confinamento dos rejeitos nas cavas podem ser eficazes, desde que os rejeitos sejam previamente neutralizados e adequadamente tratados para reduzir a umidade e o potencial de contaminação (Benzaazoua et al., 2002).

Estudos de caso demonstram como o TDB pode ser adaptado para diferentes contextos minerais. No setor de mineração de carvão na Austrália, por exemplo, técnicas de disposição de rejeitos secos foram implementadas para reduzir a necessidade de novas barragens de rejeitos. Os resultados mostraram que, com a adaptação adequada de equipamentos e processos, a disposição de rejeitos secos pode minimizar o impacto na paisagem e reduzir a necessidade de manutenção contínua, comprovando que o conceito do TDB pode ser aplicado a outros minerais.

Outro exemplo inclui a mineração de ouro, onde técnicas de disposição de rejeitos secos foram testadas para diminuir o risco de contaminação das águas subterrâneas. De acordo com Bellmann et al. (2015), com um tratamento adequado antes da secagem, os rejeitos de ouro podem ser dispostos de forma segura, minimizando o risco de impactos ambientais e aumentando a segurança operacional. Esses estudos destacam a necessidade de adaptar o TDB às especificidades de cada mineral e ao contexto operacional.

As lições aprendidas com a aplicação do TDB em diferentes minerais apontam para a necessidade de adaptações específicas. Conforme observado por Azevedo et al. (2018), cada tipo de mineral possui características únicas nos seus rejeitos, exigindo ajustes específicos nos processos de secagem, tratamento e disposição. Investimentos iniciais significativos em infraestrutura podem ser necessários para implementar o TDB em operações existentes, mas esses custos tendem a ser compensados pela redução de custos a longo prazo e pela mitigação de riscos ambientais (Cao et al., 2018).

Bolto et al. (2007) afirmam que a flexibilidade operacional proporcionada pelo TDB permite ajustes rápidos às mudanças nas condições do local de mineração, sem a necessidade de obras complexas de alteamento de barragens. Além disso, o apoio regulatório e a comunicação transparente com as comunidades locais são essenciais

para o sucesso da implementação do TDB, ressaltando seus benefícios ambientais e de segurança (Bullard et al., 2015).

#### **4.5 Critérios da ANM para a disposição de rejeitos**

A ANM estabelece critérios rigorosos para a disposição de rejeitos e a segurança das barragens, como consta na Resolução nº 13/2019 da ANM. Entre os requisitos estão a obrigatoriedade de monitoramento regular, a realização de auditorias técnicas e o cumprimento de um Plano de Segurança de Barragem (PSB) para evitar desastres ambientais. No caso do TDB, a implementação dessa tecnologia pode ajudar mineradoras a cumprir os critérios de segurança e disposição de rejeitos, já que elimina a necessidade de novas barragens e áreas de deposição.

Além disso, o método TDB se alinha com as diretrizes da Lei Federal nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). De acordo com essa legislação, todas as barragens devem ser constantemente monitoradas e sujeitas a vistorias periódicas. Ao optar pelo TDB, que não requer o uso de barragens convencionais, as empresas podem reduzir os custos associados ao monitoramento constante e evitar possíveis penalidades por não conformidade. As sanções previstas pela ANM para o descumprimento das normas de segurança são severas e incluem multas, interdições e até a cassação de licenças de operação. De acordo com a Resolução ANM nº 23/2020, as multas para infrações podem variar de R\$ 1.000 a R\$ 100.000.000, dependendo da gravidade da infração e do dano ambiental causado. Em casos mais graves, como o rompimento de barragens, as mineradoras podem enfrentar sanções adicionais, inclusive criminais, conforme previsto na Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998).

Em termos fiscais, as empresas de mineração estão sujeitas à Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), conforme estabelecido pela Lei nº 13.540/2017. O CFEM é calculado com base no faturamento bruto da empresa, e as alíquotas variam de acordo com o tipo de mineral extraído. No caso da bauxita, a alíquota é de 3,5%. A adoção do TDB pode impactar a economia fiscal da empresa, uma vez que o reaproveitamento dos rejeitos pode ser considerado um benefício ambiental, possibilitando uma redução nos passivos ambientais e, em alguns casos, incentivos fiscais relacionados à sustentabilidade.

A relação entre o Tailings Dry Backfill (TDB) e a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) se dá principalmente pelos impactos econômicos e fiscais gerados pelo método de disposição a seco de rejeitos. A CFEM, prevista na Constituição Federal de 1988 e regulamentada pela Lei nº 13.540/2017, incide sobre a receita bruta da venda de recursos minerais, excluindo tributos e despesas de transporte e seguro. Nesse contexto, o TDB pode influenciar diretamente essa base de cálculo ao permitir o reaproveitamento de rejeitos.

Quando os rejeitos anteriormente descartados em barragens passam a ser reutilizados, eles podem gerar novas receitas. Por exemplo, minerais residuais presentes nesses materiais podem ser recuperados com tecnologias modernas e vendidos, ou os rejeitos podem ser utilizados como insumos em outras indústrias, como na fabricação de cimento ou em projetos ambientais. Essas receitas, por sua vez, são incluídas na base de cálculo da CFEM, aumentando o montante devido por conta da compensação financeira.

Além disso, a adoção do TDB traz benefícios fiscais indiretos ao reduzir os passivos ambientais da empresa. Como o método elimina a necessidade de barragens, os custos relacionados à manutenção, monitoramento e eventual descomissionamento dessas estruturas são significativamente reduzidos. Isso pode impactar positivamente o balanço financeiro da mineradora, melhorando sua capacidade de investir em outras áreas e, em alguns casos, possibilitando o acesso a incentivos fiscais voltados à sustentabilidade.

Em algumas situações, iniciativas que promovem tecnologias de menor impacto ambiental, como o TDB, podem ser elegíveis para benefícios tributários. Esses incentivos, que variam conforme a legislação local, podem incluir deduções no Imposto de Renda ou a concessão de créditos fiscais, reforçando ainda mais as vantagens econômicas do método.

Embora a legislação mineral brasileira não faça distinção entre métodos de disposição de rejeitos no cálculo da CFEM, o reaproveitamento econômico proporcionado pelo TDB representa uma oportunidade para as empresas mineradoras aumentarem suas receitas sem, necessariamente, aumentar sua área de exploração. Ao mesmo tempo, o método reduz os riscos ambientais e melhora a imagem da empresa perante o mercado e a sociedade, aspectos que, de forma indireta, também podem gerar ganhos financeiros.

Portanto, o TDB e a CFEM estão conectados de maneira estratégica. O reaproveitamento de rejeitos promovido pelo TDB pode impactar positivamente a base de cálculo da compensação financeira, enquanto a redução de passivos ambientais e a possibilidade de incentivos fiscais tornam o método uma alternativa economicamente vantajosa e ambientalmente sustentável para as mineradoras.

Quadro 6: Principais Legislações e Normas Aplicáveis ao Método TDB

<b>Legislação/Norma</b>	<b>Breve Descritivo</b>
<b>Resolução ANM nº 13/2019</b>	Exige auditorias regulares, monitoramento contínuo e a implementação de Planos de Segurança de Barragens (PSB), visando prevenir rompimentos e desastres ambientais relacionados a barragens de rejeitos.
<b>Lei Federal nº 12.334/2010 (PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens)</b>	Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens, que exige o monitoramento, inspeções periódicas e a implementação de planos de segurança para prevenir desastres e proteger o meio ambiente e a população.
<b>Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais)</b>	Define crimes ambientais e prevê sanções rigorosas, como multas e penas de prisão, para quem causar danos ambientais, especialmente em casos de rompimento de barragens e poluição ambiental.
<b>Lei nº 13.540/2017 (CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais)</b>	Regula a CFEM, estabelecendo uma alíquota de 3,5% sobre o faturamento bruto da mineração de bauxita. Os recursos são usados para projetos de infraestrutura, recuperação ambiental e compensação pelos danos causados.
<b>Lei nº 12.305/2010 (PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos)</b>	Estabelece diretrizes para a gestão sustentável de resíduos sólidos, incentivando a redução, reutilização e reciclagem, além de promover práticas de economia circular e responsabilizar as empresas pela gestão adequada de seus resíduos.

Fonte: Adaptado da ANM, DNPM e ABNT (2024).

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) também desempenha um papel crucial na regulamentação da disposição de rejeitos e na implementação de tecnologias como o TDB. A NBR 13028:2017 trata dos requisitos técnicos para o tratamento e disposição de rejeitos, destacando a necessidade de estabilização dos materiais e de critérios rígidos de segurança. A implementação do TDB precisa seguir esses parâmetros para garantir a segurança e a eficácia no preenchimento das minas.

Outra norma relevante é a NBR 14005:2015, que regulamenta a gestão de resíduos sólidos industriais, incluindo os rejeitos de mineração. Essa norma define as melhores práticas para o manejo de resíduos e incentiva tecnologias que promovam a reutilização e reciclagem dos materiais, exatamente o que o TDB propõe.

#### **4.6 Comparativo entre o TDB e Métodos Convencionais de Disposição de Rejeitos**

O método de disposição de rejeitos por meio do Tailings Dry Backfill (TDB) apresenta uma alternativa promissora e eficiente, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Diferente das barragens tradicionais, que exigem grandes obras de infraestrutura e monitoramento contínuo, o TDB reduz significativamente a necessidade de materiais externos e intervenções técnicas constantes. Essa simplificação operacional representa uma economia considerável a longo prazo, além de oferecer maior segurança para as operações de mineração.

Uma das vantagens mais marcantes do TDB está na sua capacidade de minimizar riscos ambientais, principalmente em áreas próximas a comunidades. Como os rejeitos são compactados e dispostos em cavas secas, o risco de desastres associados ao rompimento de barragens é praticamente eliminado. Essa característica faz do TDB uma escolha estratégica em termos de responsabilidade socioambiental, pois garante maior proteção tanto para o meio ambiente quanto para as populações próximas às áreas mineradas.

Além disso, o uso do TDB também contribui para uma estabilidade geotécnica superior, já que os rejeitos, ao serem compactados, criam uma estrutura sólida e resistente. Esse fator é especialmente relevante em regiões com desafios geotécnicos complexos, onde o controle sobre a disposição dos rejeitos é essencial para prevenir deslizamentos e rupturas.

Do ponto de vista econômico, a reutilização de áreas mineradas para a disposição dos rejeitos elimina a necessidade de novas construções ou de grandes espaços de armazenamento. Isso não só reduz os custos com infraestrutura, mas também otimiza a gestão territorial, algo cada vez mais importante na mineração moderna. Com essa abordagem, recursos antes destinados à manutenção de barragens podem ser redirecionados para áreas mais estratégicas das operações.

Outro ponto positivo é a redução no consumo de água, já que o TDB dispensa o uso de grandes volumes no processo de disposição dos rejeitos. Isso diminui custos com tratamento de efluentes e reduz o impacto ambiental. Além disso, essa economia de recursos hídricos torna o método uma solução mais sustentável, alinhada às demandas por práticas mais responsáveis na mineração.

De acordo com Alevan, Pires e Ribeiro (2016), o TDB reduz a dependência de materiais externos e de grandes obras de infraestrutura, ao contrário das barragens tradicionais, que exigem construções complexas e manutenção contínua. Isso resulta em uma menor complexidade operacional, além de uma redução dos custos relacionados à implementação e monitoramento de barragens, tornando o TDB uma solução mais econômica a longo prazo.

Alves (2020) ressalta que o TDB oferece uma redução significativa nos custos de manutenção em longo prazo, enquanto as barragens tradicionais demandam monitoramento constante e reparos frequentes para garantir sua segurança, o TDB, por trabalhar com rejeitos secos e compactados, minimiza a necessidade de intervenções técnicas. Isso se traduz em uma economia substancial para as empresas, que podem redirecionar esses recursos para outras áreas estratégicas da operação.

Segundo Ávila e Bicudo (2014), a adoção de boas práticas na gestão de projetos de disposição de rejeitos com o uso do TDB também contribui para uma maior segurança nas operações de mineração, a técnica não exige o monitoramento de grandes volumes de água, o que diminui significativamente o risco de acidentes ambientais, em regiões próximas a comunidades, essa característica do TDB proporciona uma solução mais segura, mitigando o risco de desastres como o rompimento de barragens, que pode causar impactos devastadores.

Chaves (2013) enfatiza que o processo de desaguamento e filtragem dos rejeitos utilizados no TDB proporciona uma base mais estável e segura para a disposição, a filtragem dos rejeitos líquidos e sua compactação nas cavas evitam a liquefação, que é uma das principais causas de rompimento em barragens convencionais.

Crystal, Chore e Ezama (2018) destacam que o TDB também oferece vantagens significativas em termos de estabilidade geotécnica, o empilhamento de rejeitos secos, por exemplo, por meio de técnicas de filtragem e compactação, proporciona uma estrutura sólida que reduz os riscos de deslizamentos ou rupturas, o que acaba por ser especialmente importante em áreas de mineração com grandes desafios

geotécnicos, onde o controle sobre a disposição dos rejeitos é fundamental para garantir a segurança e eficiência da operação.

De acordo com Gomes (2009), a escolha do TDB como técnica de disposição de rejeitos também está relacionada aos seus benefícios econômicos e ambientais, ao reutilizar áreas já mineradas para a disposição dos rejeitos, o TDB elimina a necessidade de novas construções e grandes áreas de armazenamento, resultando em uma economia substancial em termos de infraestrutura.

#### **4.7 Variáveis que Influenciam a Escolha do TDB**

Segundo Silva (2023), as técnicas de disposição de rejeitos minerais vêm sendo amplamente discutidas como uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos convencionais, a busca por soluções mais sustentáveis e seguras tem impulsionado o desenvolvimento de novas abordagens no setor de mineração.

De acordo com Alevan, Pires e Ribeiro (2016), a Co disposição e a disposição compartilhada têm se mostrado vantajosas, pois oferecem maior segurança e melhor aproveitamento de áreas de descarte, as técnicas minimizam os riscos de desastres ambientais e otimizam o uso de recursos.

Alves (2020) indica que o empilhamento de rejeitos filtrados é uma alternativa promissora à substituição das barragens, essa técnica não apenas reduz o volume de rejeitos líquidos, mas também permite uma disposição mais controlada e segura, evitando acidentes como os que ocorreram em Mariana e Brumadinho. Em casos que seja viável a disposição de rejeitos filtrados em cavas de mineração, há ganhos em termos de redução de área para empilhamento e menor complexidade do processo de descaracterização das áreas de disposição de rejeito.

Ávila e Bicudo (2014) destacam que as boas práticas na gestão de projetos de barragens de rejeitos são fundamentais para garantir a segurança das operações, a adoção de novas técnicas, aliada à fiscalização rigorosa, pode prevenir grandes desastres ambientais e sociais.

Segundo Chaves (2013), o desaguamento, espessamento e filtragem dos rejeitos são processos essenciais para garantir que o material disposto seja seguro e estável, os processos podem ser otimizados com o uso de tecnologias modernas, proporcionando maior controle sobre os rejeitos.

Crystal, Chore e Ezama (2018) enfatizam que o empilhamento a seco, por meio de filtros prensa, é uma técnica eficiente que vem sendo aplicada com sucesso em várias operações de mineração, a abordagem diminui a necessidade de grandes áreas para barragens de rejeitos e reduz o impacto ambiental, demonstrando a possibilidade de consorciar esta tecnologia com o método de disposição TDB.

Gomes (2009) aponta que a metodologia de análise hierárquica aplicada à escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração permite uma análise mais detalhada das alternativas disponíveis, levando em consideração aspectos econômicos, ambientais e de segurança.

Lozano (2006) ressalta a importância de uma seleção criteriosa dos locais para a construção de barragens de rejeitos, a análise do terreno, junto com a utilização de métodos de disposição mais eficientes, pode reduzir significativamente o risco de falhas estruturais, conforme o Quadro 7 a seguir busca de maneira resumida destacar:

Quadro 7: Comparação entre Técnicas de Disposição de Rejeitos

<b>Técnica</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Barragens de Rejeitos convencionais	Alta capacidade de armazenamento.	Risco de rompimento e alto custo de manutenção e monitoramento. Alta complexidade e custo no processo de descaracterização
Empilhamento de Rejeitos Filtrados	Menor risco de acidentes e menor uso de áreas. Alto reaproveitamento de água.	Alto custo inicial de implementação. Maior complexidade no processo de fechamento.
Codisposição (TDB)	Melhor aproveitamento de áreas e segurança. Reduz ou exclui a necessidade de novas barragens. Reduz a complexidade do processo de descaracterização e fechamento das barragens.	Demanda ajustes na dinâmica operacional, requer planejamento rigoroso.

Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Russo (2007) analisa o comportamento das barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico, destacando que a simulação numérica do processo construtivo é uma ferramenta importante para antecipar possíveis falhas e melhorar a segurança das operações.

As pesquisas sobre o uso de rejeitos da mineração apontam diversas formas de aproveitamento, incluindo sua aplicação em setores como construção civil e agricultura, as iniciativas oferecem soluções sustentáveis e que são variáveis importantes nas análises para o gerenciamento de rejeitos (UFOP, 2019).

Segundo Silva (2023), a adoção de novas técnicas de disposição de rejeitos, como o empilhamento a seco, vem se expandindo no setor de mineração, impulsionada pela necessidade de maior segurança e sustentabilidade, as alternativas destacadas são uma resposta às falhas das barragens convencionais.

Alevan, Pires e Ribeiro (2016) destacam que, além dos aspectos de segurança, a Co disposição de rejeitos oferece vantagens econômicas, já que permite a otimização dos processos e a redução de custos operacionais em longo prazo.

Alves (2020) observa que o empilhamento de rejeitos filtrados proporciona não apenas maior controle sobre a disposição do material, mas também facilita o processo de recuperação ambiental das áreas mineradas, conforme destacado por meio do Quadro 8:

Quadro 8: Impacto das Técnicas de Disposição de Rejeitos no Meio Ambiente

<b>Técnica</b>	<b>Impacto Ambiental</b>	<b>Complexidade de Recuperação Ambiental</b>
Barragens de Rejeitos	Alto impacto em caso de rompimento. Redução de habitat por necessidade de grandes áreas.	Alto, devido à grande área afetada e material disposto.
Empilhamento de Rejeitos Filtrados	Impacto moderado e controlado.	Moderado, permite recuperação rápida das áreas, porém implica em complexidade devido a compactação e composição do material.
Codisposição (TDB)	Impacto controlado e menor uso de áreas.	Baixo, bacias de disposição temporária podem ser descaracterizadas e recuperadas por processo padrão.

Fonte: Adaptado e complementado de Alevan et al. (2016).

Ávila e Bicudo (2014) destacam que, com a adoção de boas práticas de gestão, o risco de acidentes com barragens de rejeitos pode ser significativamente reduzido, contudo as novas tecnologias oferecem uma segurança maior quando comparadas aos métodos tradicionais.

Chaves (2013) reforça que o processo de espessamento dos rejeitos é uma etapa crucial no tratamento de minérios, proporcionando uma redução significativa no volume de rejeitos líquidos e facilitando o seu descarte de maneira segura.

Segundo Crystal, Chore e Ezama (2018), a implementação do empilhamento de rejeitos secos é uma tendência crescente nas mineradoras ao redor do mundo, devido ao seu menor impacto ambiental e à segurança que proporciona em termos de estabilidade geotécnica.

Gomes (2009) conclui que o uso de metodologias como a análise hierárquica para a escolha do método de disposição de rejeitos permite uma tomada de decisão mais informada, levando em consideração fatores que vão além do custo, como segurança e impacto ambiental.

#### 4.7.1 Análise dos Impactos Econômicos Positivos do TDB

Segundo Silva (2023), o TDB surge como uma alternativa economicamente viável, especialmente quando comparado às barragens convencionais, essa alternativa destaca-se pela sua capacidade de aproveitar áreas mineradas já existentes, o que gera uma redução significativa nos custos de infraestrutura e monitoramento geotécnico.

De acordo com Alevan, Pires e Ribeiro (2016), a codisposição de rejeitos, combinada ao TDB, possibilita uma disposição mais eficiente dos materiais, reduzindo o impacto econômico das operações de descarte, permitindo que as mineradoras economizem recursos, otimizando os processos de disposição de rejeitos.

Alves (2020) observa que o empilhamento de rejeitos filtrados, técnica associada ao TDB, diminui o volume de material líquido, o que contribui diretamente para a redução dos passivos ambientais, onde o resultado na maioria das vezes é uma economia de longo prazo, visto que a necessidade de manutenção de barragens tradicionais é eliminada.

Ávila e Bicudo (2014) destacam que a implementação do TDB, ao contrário das barragens convencionais, não exige monitoramento constante de grandes volumes de água, proporcionando uma economia significativa para as mineradoras, que podem redirecionar esses recursos para outras áreas de operação.

Segundo Chaves (2013), o processo de desaguamento e filtragem dos rejeitos associado ao TDB é mais econômico a longo prazo, já que minimiza a geração de

rejeitos líquidos e, conseqüentemente, os custos de descarte, o que tecnicamente permite um controle mais efetivo dos resíduos gerados nas operações.

Crystal, Chore e Ezama (2018) afirmam que o empilhamento de rejeitos secos, técnica amplamente utilizada no TDB, exige menos investimentos em infraestrutura comparado às barragens tradicionais, a redução de grandes áreas de armazenamento também contribui para a diminuição dos custos de longo prazo.

Gomes (2009) aponta que o TDB representa uma alternativa de menor custo inicial quando comparado a outras técnicas de disposição de rejeitos, a simplicidade do processo de secagem e empilhamento dos rejeitos torna-o uma opção atraente para empresas que buscam eficiência econômica.

Lozano (2006) ressalta que o TDB, ao utilizar áreas já mineradas para a disposição de rejeitos, reduz significativamente a necessidade de aquisição de novas terras e a construção de novas barragens. Isso resulta em uma economia substancial em termos de investimentos em infraestrutura.

Quadro 9: Comparação de Custos entre Barragens Tradicionais e TDB

<b>Técnica</b>	<b>Custo Inicial</b>	<b>Custo de Manutenção</b>	<b>Potencial de Economia a Longo Prazo</b>
Barragens de Rejeitos	Alto	Alto	Baixo
TDB (Tailings Dry Backfill)	Moderado	Baixo	Alto

Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Russo (2007) discute os impactos econômicos das barragens de rejeitos, afirmando que o custo de manutenção dessas estruturas é elevado devido à necessidade de monitoramento contínuo, em contrapartida, o TDB elimina essa necessidade, resultando em menores custos operacionais.

Alguns estudos da UFOP (2019) apontam que o uso do TDB tem o potencial de transformar rejeitos em oportunidades econômicas, ao reutilizar áreas mineradas e otimizar os processos de descarte, essa reutilização permite que as mineradoras obtenham um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Segundo Silva (2023), ao eliminar a necessidade de grandes barragens, o TDB proporciona uma redução significativa nos passivos econômicos das empresas de mineração, com menor risco de desastres ambientais, o custo de indenizações e ações corretivas é drasticamente reduzido.

Alevan, Pires e Ribeiro (2016) destacam que, além dos benefícios econômicos diretos, o TDB também contribui para a redução dos custos relacionados ao impacto ambiental, a técnica evita a contaminação de águas subterrâneas e a necessidade de grandes obras de recuperação ambiental.

Alves (2020) afirma que o empilhamento de rejeitos secos não apenas reduz o custo de disposição, mas também facilita a recuperação das áreas mineradas, gerando uma economia adicional para as mineradoras no momento do fechamento das minas.

Quadro 10: Comparação de Custos de Manutenção Ambiental

<b>Técnica</b>	<b>Custo de Recuperação Ambiental</b>	<b>Risco de Impacto Ambiental</b>	<b>Economia com Recuperação</b>
Barragens de Rejeitos	Alto	Alto	Baixo
TDB	Baixo	Baixo	Alto

Fonte: Adaptado de Alevan et al. (2016).

Ávila e Bicudo (2014) destacam que, além dos benefícios econômicos, a técnica do TDB oferece uma solução ambientalmente mais segura, já que elimina o risco de rompimentos de barragens e os custos associados à contenção de desastres.

Chaves (2013) reforça que o processo de desaguamento e empilhamento de rejeitos secos, usado no TDB, requer menos investimentos em monitoramento e manutenção, o que gera uma economia considerável em longo prazo para as empresas mineradoras.

Segundo Crystal, Chore e Ezama (2018), o TDB não apenas reduz os custos operacionais e ambientais, mas também melhora a eficiência no uso de recursos, permitindo que as empresas maximizem seus lucros ao mesmo tempo em que diminuem os riscos de desastres ambientais.

#### 4.7.2 *Eficiência e Segurança: O TDB como Alternativa Sólida*

De acordo com Alevan, Pires e Ribeiro (2016), o TDB reduz os riscos de rompimentos catastróficos que costumam ocorrer em barragens convencionais, garantindo maior segurança para as comunidades próximas às operações de mineração, o método minimiza o risco de acidentes, oferecendo uma alternativa mais confiável.

Alves (2020) aponta que o TDB, por evitar grandes volumes de rejeitos líquidos, reduz a pressão sobre as estruturas de contenção, o que contribui significativamente para a estabilidade geotécnica, isso é particularmente importante em regiões suscetíveis a terremotos ou atividades sísmicas.

Ávila e Bicudo (2014) afirmam que as técnicas de desaguamento utilizadas no TDB proporcionam maior controle sobre o material disposto, o que diminui a probabilidade de desastres ambientais e facilita o monitoramento de possíveis falhas. Essa segurança adicional torna o TDB uma escolha preferível.

Segundo Chaves (2013), a filtragem e compactação dos rejeitos proporcionam uma base sólida e estável para a deposição em cavas, aumentando a eficiência do processo de disposição, o TDB elimina o risco de liquefação, um dos principais causadores de desastres em barragens de rejeitos.

Crystal, Chore e Ezama (2018) destacam que o TDB promove uma solução segura para regiões com grande densidade populacional, ao evitar grandes barragens de rejeitos que podem comprometer a segurança das áreas ao redor, o empilhamento de rejeitos secos garante uma operação mais segura e eficiente.

Gomes (2009) menciona que a estabilidade geotécnica proporcionada pelo TDB é um fator crucial na escolha dessa técnica em minas localizadas em áreas com condições de solo instáveis, a compactação dos rejeitos secos reduz os riscos de deslizamentos e rupturas nas estruturas de contenção.

Lozano (2006) ressalta que, além da eficiência, o TDB oferece um nível de segurança superior quando comparado às barragens convencionais, que dependem de sistemas de drenagem complexos para evitar rupturas, o método proporciona uma solução mais simples e eficaz para a disposição de rejeitos.

Quadro 11: Comparação de Segurança entre Barragens Convencionais e TDB

<b>Técnica</b>	<b>Risco de Ruptura</b>	<b>Estabilidade Geotécnica</b>	<b>Nível de Segurança</b>
Barragens de Rejeitos	Varia conforme o método construtivo (baixo a alto)	Depende das condições geotécnicas e hídricas (moderada a alta)	Determinado por cálculos específicos de estabilidade
TDB (Tailings Dry Backfill)	Baixo à nulo	Alta	Alta

Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Russo (2007) analisa o comportamento das barragens de rejeitos em situações de risco, destacando que o TDB, ao contrário das barragens tradicionais, elimina a dependência de grandes volumes de água, que representam um fator de instabilidade nas barragens, a característica do TDB resulta em maior segurança e confiabilidade nas operações.

A UFOP (2019) em suas pesquisas sugere que o TDB também é uma solução viável em termos de segurança social, pois elimina o risco de grandes inundações e rupturas de barragens que poderiam afetar negativamente comunidades próximas, o método oferece uma camada extra de proteção ambiental e social.

Segundo Silva (2023), a compactação dos rejeitos nas cavas garante que o material permaneça estável mesmo em condições adversas, como chuvas intensas ou mudanças climáticas extrema, esse controle contribui para a segurança das operações e evita problemas associados à erosão e instabilidade do solo.

Alevan, Pires e Ribeiro (2016) afirmam que o TDB, por não depender de barragens externas para armazenar grandes volumes de rejeitos líquidos, reduz drasticamente os riscos ambientais. ainda a técnica proporciona uma disposição controlada e segura, mitigando o impacto das operações de mineração.

Alves (2020) reforça que o TDB oferece vantagens significativas em termos de monitoramento, pois o processo de disposição de rejeitos secos facilita a identificação de possíveis falhas, com isso, as empresas conseguem implementar medidas preventivas de forma mais eficaz, assegurando maior estabilidade nas operações.

Quadro 12: Comparação de Estabilidade e Segurança Socioambiental

<b>Técnica</b>	<b>Controle sobre Rejeitos Líquidos</b>	<b>Estabilidade em Condições Climáticas Extremas</b>	<b>Segurança Social</b>
Barragens de Rejeitos	Baixo	Baixa	Baixa
TDB (Tailings Dry Backfill)	Alto	Alta	Alta

Fonte: Adaptado de Alevan et al. (2016).

Ávila e Bicudo (2014) afirmam que, com o TDB, o impacto ambiental causado por desastres de mineração é praticamente eliminado, já que o risco de rompimento de barragens é inexistente, isso também facilita a recuperação ambiental das áreas mineradas, uma vez que a disposição dos rejeitos é controlada.

Chaves (2013) reforça que o empilhamento de rejeitos secos utilizado no TDB proporciona uma solução mais eficaz para a disposição segura, especialmente em minas que operam em áreas com grandes desafios geotécnicos, a técnica permite maior flexibilidade e segurança no manejo de rejeitos.

## 5 CONCLUSÃO

A tecnologia Tailings Dry Backfill (TDB) surge como uma alternativa inovadora e eficaz para a disposição de rejeitos de mineração, apresentando vantagens significativas em comparação aos métodos convencionais, como as barragens de rejeitos. Ao longo deste trabalho, foram analisadas suas principais características e potencialidades, demonstrando como o TDB pode contribuir para uma gestão mais segura e sustentável dos rejeitos no setor minerário.

Em relação ao primeiro objetivo específico, conclui-se que o TDB é ambientalmente adequado, pois minimiza os riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas ao promover a secagem e o confinamento de rejeitos secos nas cavas de mineração. A redução na mobilidade de poluentes, aliada à diminuição da necessidade de grandes áreas para disposição de rejeitos, torna essa tecnologia uma opção mais sustentável e menos impactante para o meio ambiente.

No que se refere ao segundo objetivo específico, a análise indica que o TDB é tecnicamente e operacionalmente adequado. A tecnologia permite um maior controle sobre a hidratação e a compactação dos rejeitos, aumentando sua estabilidade estrutural e reduzindo os riscos de falhas mecânicas. Além disso, o TDB requer menos infraestrutura intensiva e custos operacionais mais baixos, ao evitar processos de manutenção e alteamento das barragens, proporcionando maior segurança nas operações de mineração.

Quanto ao terceiro objetivo específico, o estudo demonstrou que o TDB pode ser recomendado e aplicado no processo industrial de outros minerais, desde que sejam realizadas adaptações específicas às características de cada rejeito e contexto de mineração. A flexibilidade operacional do TDB e sua capacidade de melhorar a segurança e a sustentabilidade na gestão de rejeitos evidenciam seu potencial de aplicação em diferentes setores da mineração.

Os benefícios econômicos do TDB também são evidentes, embora o investimento inicial para sua implementação possa ser elevado, conforme apontado por Azevedo et al. (2018), os custos de longo prazo são reduzidos, já que o método elimina a necessidade de construção e manutenção de barragens, a economia gerada ao evitar barragens se estende ao monitoramento contínuo e às manutenções frequentes, que são obrigatórias para as estruturas tradicionais, a reutilização dos rejeitos diretamente nas minas reduz o impacto ambiental e diminui a ocupação de novas áreas, uma

vantagem significativa para as mineradoras em termos de sustentabilidade e responsabilidade social (Bellmann et al., 2015).

Do ponto de vista legal e regulatório, a adoção do TDB permite às mineradoras atenderem às exigências da Agência Nacional de Mineração (ANM) e da Lei Federal nº 12.334/2010, que estabelecem critérios rigorosos para a segurança de barragens de rejeitos. Ao eliminar a necessidade de novas barragens, o TDB contribui para que as empresas mineradoras cumpram as normas de segurança e reduzam o risco de enfrentar sanções severas, como multas e interdições, conforme prevê a legislação (Resolução ANM nº 13/2019).

O TDB também se alinha com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, que incentiva a redução, reutilização e reciclagem de resíduos industriais. Essa tecnologia oferece uma alternativa eficiente para o reaproveitamento dos rejeitos de mineração, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo e para a preservação dos recursos naturais. A economia de água proporcionada pelo TDB é outro fator importante, principalmente em um contexto de crescente escassez hídrica ( Boger, 2009).

Por fim, este trabalho conseguiu cumprir seu objetivo geral de apresentar uma revisão sistemática sobre a tecnologia TDB, analisando sua viabilidade ambiental, técnica e operacional, bem como sua aplicabilidade em diferentes contextos industriais. Através dessa revisão, foi possível destacar os benefícios e as limitações da tecnologia, contribuindo para um melhor entendimento sobre sua utilização no setor de mineração e fornecendo subsídios para futuras pesquisas e implementações práticas.

Para pesquisas futuras, é importante explorar alternativas que reduzam o impacto da escassez hídrica nas atividades de mineração. Um foco pode ser o desenvolvimento de tecnologias que minimizem o uso de água, como sistemas de reciclagem de efluentes e métodos de beneficiamento a seco. Outro aspecto relevante é investigar práticas de gestão de recursos hídricos, como o monitoramento do consumo de água e estratégias de captação de água da chuva. Esses estudos poderão contribuir para uma mineração mais sustentável em regiões com recursos hídricos limitados.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: Tijolo de solo-cimento — análise dimensional, determinação da resistência. Rio de Janeiro, **ABNT**, 2012.

ALDHAFEERI, Z. et al. Sulphate induced changes in the reactivity of cemented tailings backfill. **Int. J. Miner. Process.**, 2017.

ALEVAN, G. M.; PIRES, A. C. G.; RIBEIRO, L. F. M. Análise das possibilidades de depósito de estéreis e rejeitos de mineração: as vantagens da codisposição e da disposição compartilhada. **10º Simpósio Nacional de Qualidade Ambiental – Regulamentação Ambiental, Desenvolvimento e Inovação**, Porto Alegre. 2016.

ALMEIDA, R. L.; WANDERLEY, L. J. Rompimento da barragem de Brumadinho e suas consequências ambientais: Análise crítica e propostas para a gestão de rejeitos de mineração. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 45-56, 2019.

ALVES, Francisco. Hydro Paragominas desenvolve método inovador para os rejeitos. **Revista Brasil Mineral**, edição nº 434, página 66 a 69. Outubro de 2023. Disponível em <<https://www.brasilmineral.com.br/revista/434/?p=66>>. Acesso em 26/03/2024.

ALVES, P. I. A. Empilhamento e Rejeito Filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. 114 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2020.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília: ANM, 2020.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 13, de 08 de agosto de 2019. Dispõe sobre critérios para garantir a segurança das barragens de mineração. **Diário Oficial da União: Brasília**, 12 ago. 2019.

ASSUNÇÃO, T. A transformação da bauxita em alumínio: processos e desafios. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 10, n. 1, p. 1-15, 2024.

ÁVILA, J.P. de; BICUDO, R.I. Boas práticas na gestão de projetos de barragens de rejeitos. In: Seminário sobre a gestão da segurança de barragens em mineração, Org. **DNPM/IBRAM/SINDIEXTRA/ FEAM/CREA-MG**, 2014.

AZEVEDO, N. H. d. et al. Effect of silicon carbide nanowhiskers on hydration and mechanical properties of a Portland cement paste. **Constr. Build. Mater.**, 2018.

BARROS, Yandiara Larissa Neves de. Tijolos de solo-cimento com substituição parcial do solo por lama de alto-forno. 2023. **Trabalho apresentado ao Repositório Institucional do Ministério da Educação**. Disponível em: <[repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3581](https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3581)>. Acesso em: 05 out. 2024.

BEEN, K.; JEFFERIES, M. G. A state parameter for sands. **Géotechnique**, v. 35, n. 2, p. 99-112, 1985.

BELLMANN, F. et al. Dissolution rates during the early hydration of tricalcium silicate. **Cem. Concr. Res.**, 2015.

BENZAOUA, M. et al. Chemical factors that influence the performance of mine sulphidic paste backfill. **Cem. Concr. Res.**, 2002.

BOGER, D. V. Rheology and the resource industries. **Chem. Eng. Sci.**, 2009.

BOLTO, B. et al. Organic polyelectrolytes in water treatment. **Water Res.**, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, com foco na gestão integrada e no gerenciamento sustentável de resíduos. **Diário Oficial da União: Brasília**, 03 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens e estabelece diretrizes para a regulamentação da segurança das barragens em todo o território nacional. **Diário Oficial da União: Brasília**, 21 set. 2010.

BRASIL. Lei nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017. Altera a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM). **Diário Oficial da União: Brasília**, 19 dez. 2017.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. **Diário Oficial da União: Brasília**, 13 fev. 1998.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cem. Concr. Res.**, 2011.

BULLARD, J. W. et al. Time dependent driving forces and the kinetics of tricalcium silicate hydration. **Cem. Concr. Res.**, 2015.

CAO, S. et al. Influence of structural factors on uniaxial compressive strength of cemented tailings backfill. **Constr. Build. Mater.**, 2018.

CASAGRANDE, A. Characteristic of cohesionless soils affecting the stability of slope and earth fill. **Journal of the Boston Society of Civil Engineering**, p. 13-32, 1936.

CASTILHO, B.; BORGES, A.; AGRIPINO, L.; BRETAS, V.; DAMAS, R.; SALDANHA, J.; SALDANHA, J. Enhanced Desiccation of Bauxite Tailings by Solar Drying. In: **Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference**, Travaux No. 49, p. 107-116, 2020.

CEDRO, L. G. Análise do processo de adensamento aplicado ao fechamento de reservatório de rejeito de bauxita. 2023. Disponível em: <http://www.btdt.uerj.br/handle/1/20524>. Acesso em: 5 set. 2024.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: desaguamento, espessamento e filtragem, São Paulo: **Signus**, 2013,

CHEN, Q. S. et al. Experimental investigation on the strength characteristics of cement paste backfill in a similar stope model and its mechanism. **Constr. Build. Mater.**, 2017.

COELHO, P. H. G.; FERNANDES, G. W.; VALE, M. M. Impactos ambientais e sociais do rompimento da barragem de rejeitos da Samarco em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 69, n. 3, p. 26-30, 2017.

COELHO, R. Governo do Pará conhece novo projeto de destinação de rejeito de bauxita. **Agência Pará**. 12 de agosto de 2020. Disponível em <<https://agenciapara.com.br/noticia/21435/governo-do-para-conhece-novo-projeto-de-destinacao-de-rejeito-de-bauxita>>. Acesso em 26/03/2024.

COLETIVO DE AUTORES. Metodologia do ensino da Educação Física. São Paulo: **Cortez Editora**, 1992.

COSTA, J. H. B. Modelagem matemática aplicada à desagregação da bauxita. **Revista Brasileira de Engenharia de Minas**, v. 5, n. 2, p. 34-48, 2024.

CRU Consulting. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy. Preparado para o **International Aluminium Institute (IAI)**. CRU Reference: ST2342-21. 28/01/2022. Disponível em: [https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/?\\_thumbnail\\_id=6715](https://international-aluminium.org/resource/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/?_thumbnail_id=6715). Acesso em 12/01/2024.

CRYSTAL, C.; CHORE, C.; EZAMA, I. Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. **Keystone**, Colorado, EUA, 2018.

DHAWAN, Rohitesh. A little thought goes a long way in restoring nature. **International Council on Mining and Metals (ICMM)**. 11 de setembro de 2023. Disponível em <<https://www.icmm.com/en-gb/stories/2023/a-little-thought-goes-a-long-way>>. Acesso em 26/03/2024.

FIGUEIRÔA, S. F. de M. (1994). Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de sua história na Colônia e no Império (séculos XVIII-XIX). América Latina **en la Historia Económica**, v. 1, n. 1, p. 41-55.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2011.

GOMES, Márcio Fernando Mansur. Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro. 2009. 213 f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto**, 2009.

HYDRO. Relatório de Sustentabilidade. Oslo: Hydro, 2020.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração. Brasília: IBRAM, 2019.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Solução pioneira pode eliminar o uso de barragens permanentes de rejeito de bauxita. Disponível em:

<https://www.ibram.org.br/noticia/solucao-pioneira-pode-eliminar-o-uso-de-barragens-permanentes-de-rejeito-de-bauxita/>. Acesso em: 14 set. 2024.

JESUS, W. B. S.; CANDIDO, V. S.; NEVES, A. DO S. S.; SILVA, J. A. DA; MACEDO, E. N.; SILVA, R. DE L.; PEREIRA, L. F. S. Caracterização de lama de alto forno de uma siderúrgica integrada do Sudeste do Pará. **17º ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas**. 2017.

LAGE, N. M. Flotação de rejeitos de bauxita: uma abordagem sustentável. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 9, n. 3, p. 50-65, 2024.

LIMA, T. M. Regeneração de áreas mineradas: práticas e resultados. **Revista de Ecologia e Mineração**, v. 8, n. 2, p. 35-50, 2024.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. Seleção de Locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 2006. **Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo**, 2006.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Tratamento de minérios: fundamentos e práticas. *Revista Brasileira de Engenharia Mineral*, v. 6, n. 1, p. 10-25, 2024.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE (MRN). **Relatório Anual**. Oriximiná: MRN, 2021.

NIERWINSKI, H. P. Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — **Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. 2019.

PANTOJA, E. B. Solução pioneira pode eliminar o uso de barragens permanentes de rejeito de bauxita. *Hydro no Brasil*, 04 de fevereiro de 2021. Disponível em <<https://www.hydro.com.br/global/imprensa/noticias/2021/pioneer-solution-can-eliminate-use-of-permanent-bauxite-tailing-dams/>>. Acesso em 13/10/2024.

PALHETA, N. Reaproveitamento de rejeitos: um estudo de caso na Alunorte. **Revista de Sustentabilidade e Mineração**, v. 7, n. 1, p. 15-29, 2024.

RACANELLI, L. A.; OLIVEIRA, R. C. Ligantes geopoliméricos: inovação a partir de rejeitos de bauxita. **Revista Brasileira de Materiais**, v. 4, n. 1, p. 40-55, 2024.

ROBERTSON, P. K. Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT. In: **2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA**, 2010.

RODRIGUES, O. M. S. Flotação de caulinita: desafios e soluções. **Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 7, n. 2, p. 30-45, 2024.

RUSSO, F. M. Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-044/07, Brasília, DF: **Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília**, 2007

SCHNAID, F.; YU, H. S. Interpretation on the seismic cone test in granular soils. **Geotéchnique**, v. 57, p. 265-272, 2007.

SILVA, Frederico Miranda da. Estudo de técnicas de disposição de rejeitos minerais como uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos convencionais. 2023. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - **Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2023.

UFOP. Pesquisa sobre uso dos rejeitos da mineração indica diferentes maneiras de aproveitamento. **UFOP**, 2019. Disponível em: <https://www.ufop.br/noticias/pesquisa-einovacao/pesquisa-sobre-uso-dos-rejeitos-da-mineracao-indica-diferentes-maneiras>. Acessado em 12 Out. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries: Bauxite and Alumina**. Reston: USGS, 2021.

## ANEXOS

Quadro 3: Principais Autores Utilizados na Pesquisa

Nome	Ano	Tipo de Pesquisa	Objetivo	Resumo
AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM)	2020	Relatório	Analisar a segurança de barragens	Relatório técnico anual sobre a segurança de barragens de rejeitos no Brasil.
ALMEIDA, R. L.; WANDERLEY, L. J.	2019	Artigo de Revista	Analisar o rompimento de barragem e suas consequências ambientais	Estudo crítico dos impactos ambientais do rompimento da barragem de Brumadinho e propostas de melhorias.
ALVES, F.	2023	Artigo de Revista	Desenvolver método inovador para rejeitos de bauxita	Desenvolvimento de métodos inovadores para manejo de rejeitos na mineração de bauxita.
ASSUNÇÃO, T.	2024	Artigo de Revista	Estudar a transformação da bauxita em alumínio	Discussão sobre os processos de produção e desafios na transformação de bauxita em alumínio.
CASTILHO, B.; BORGES, A.; et al.	2020	Anais de Conferência	Desenvolver técnica de secagem solar para rejeitos de bauxita	Apresentação de técnica de secagem solar para rejeitos de bauxita em conferência internacional.
CEDRO, L. G.	2023	Dissertação	Analisar adensamento aplicado ao fechamento de reservatório de rejeito	Estudo de caso sobre adensamento no fechamento de reservatórios de rejeitos de bauxita.

BARRAL DAS NEVES, M. N.	2023	Dissertação	Descaracterização de barragens de rejeito de bauxita: como a indução da sucessão ecológica pode atuar na melhoria do substrato na fase inicial de descaracterização.	Uso de técnicas de revegetação e sucessão ecológica para recuperar áreas degradadas por rejeitos de bauxita, com foco na descaracterização de barragens de rejeitos.
COELHO, P. H. G.; FERNANDES, G. W.; VALE, M. M.	2017	Artigo de Revista	Analisar impactos ambientais e sociais de rompimento de barragem	Análise dos impactos ambientais e sociais do desastre de Mariana, Minas Gerais.
COELHO, Raiana	2020	Artigo de Jornal	Divulgar novo projeto de destinação de rejeito de bauxita	Notícia sobre projeto de destinação de rejeito de bauxita no estado do Pará.
COSTA, J. H. B.	2024	Artigo de Revista	Aplicar modelagem matemática à desagregação da bauxita	Modelo matemático aplicado para desagregação da bauxita em processos de mineração.
CRU Consulting	2022	Relatório Técnico	Estudar oportunidades para o alumínio no pós-pandemia.	Relatório sobre oportunidades no mercado de alumínio após a pandemia de COVID-19.
Dhawan, Rohitesh	2023	Artigo de Jornal	Restaurar natureza em contextos de mineração.	Artigo sobre práticas de restauração de áreas mineradas.
FIGUEIRÔA, Sílvia F. de M.	1994	Artigo de Revista	Analisar mineração no Brasil no século XVIII-XIX	Análise histórica da mineração no Brasil durante os períodos colonial e imperial.

HYDRO	2020	Relatório de Sustentabilidade	Divulgar práticas de sustentabilidade	Relatório anual de práticas de sustentabilidade da Hydro.
INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM)	2024	Artigo Online	Eliminar uso de barragens permanentes	Artigo sobre solução inovadora para eliminação de barragens permanentes de rejeitos.
INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM)	2019	Guia	Orientar boas práticas ambientais na mineração	Guia sobre boas práticas ambientais para a indústria de mineração.
LAGE, N. M.	2024	Artigo de Revista	Estudar flotação de rejeitos de bauxita	Estudo de técnicas de flotação aplicadas aos rejeitos de bauxita.
LIMA, T. M.	2024	Artigo de Revista	Descrever práticas de regeneração de áreas mineradas	Estudo de práticas de regeneração de áreas mineradas e seus resultados.
LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.	2024	Artigo de Revista	Definir fundamentos e práticas de tratamento de minérios	Definição de métodos e práticas fundamentais para o tratamento de minérios.
MINERAÇÃO RIO DO NORTE (MRN)	2021	Relatório Anual	Relatar atividades anuais da empresa	Relatório das atividades anuais da Mineração Rio do Norte.
NIERWINSKI, H. P.	2019	Tese de Doutorado	Caracterizar rejeitos de mineração	Tese sobre a caracterização geomecânica de rejeitos de mineração.
PALHETA, N.	2024	Artigo de Revista	Estudar reaproveitamento de rejeitos	Análise do reaproveitamento de rejeitos em processos industriais.

RACANELLI, L. A.; OLIVEIRA, R. C.	2024	Artigo de Revista	de	Estudar inovação a partir de rejeitos de bauxita	Inovação em ligantes geopoliméricos a partir de rejeitos de bauxita.
RODRIGUES, O. M. S.	2024	Artigo de Revista	de	Analisar desafios e soluções na flotação de caulinita	Estudo sobre desafios e soluções para a flotação de caulinita.
SCHNAID, F.; YU, H. S.	2007	Artigo de Revista	de	Interpretar testes sísmicos em solos granulares	Interpretação de testes sísmicos para avaliar comportamento de solos granulares.

Fonte: Da Autora (2024)

**Quadro 4:** Artigos Utilizados na Discussão e Resultados

Nome do Autor	Data	Tipo de Pesquisa	Objetivo	Resumo	
ALDHAFEERI, Z. et al.	2017	Artigo de Revista	de	Analisar mudanças na reatividade de rejeitos cimentados devido à presença de sulfatos	Estudo sobre como os sulfatos afetam a reatividade de rejeitos cimentados no método TDB.
AZEVEDO, N. H. d. et al.	2018	Artigo de Revista	de	Avaliar o efeito de nanofios de carbetto de silício nas propriedades do cimento	Estudo dos efeitos de nanofios de carbetto de silício na hidratação e propriedades mecânicas do cimento.
BELLMANN, F. et al.	2015	Artigo de Revista	de	Investigar as taxas de dissolução durante a hidratação inicial do silicato tricálcico	Análise das taxas de dissolução e hidratação de materiais cimentícios no contexto de rejeitos de mineração.
BENZAAZOUA, M. et al.	2002	Artigo de Revista	de	Identificar fatores químicos que influenciam o desempenho de backfills de pasta sulfídica	Discussão sobre os fatores químicos que impactam a estabilidade e a performance de rejeitos cimentados.
BOGER, D. V.	2009	Artigo de Revista	de	Examinar a reologia e sua importância	Análise da importância do

			nas indústrias de recursos	controle reológico na disposição de rejeitos e suas implicações para o TDB.
BOLTO, B. et al.	2007	Artigo de Revista	Estudar o uso de polieletrólitos orgânicos no tratamento de água	Pesquisa sobre a aplicação de polieletrólitos para minimizar a contaminação de rejeitos líquidos.
BULLARD, J. W. et al.	2011	Artigo de Revista	Explorar mecanismos de hidratação do cimento	Investigação dos processos de hidratação do cimento e suas implicações para a estabilidade dos rejeitos.
BULLARD, J. W. et al.	2015	Artigo de Revista	Analisar forças dependentes do tempo e cinética da hidratação do silicato tricálcico	Estudo da cinética da hidratação em rejeitos cimentados e suas influências na disposição em minas.
CAO, S. et al.	2018	Artigo de Revista	Avaliar a influência de fatores estruturais na resistência compressiva de backfills cimentados	Análise dos fatores estruturais que afetam a resistência dos rejeitos cimentados.
CHEN, Q. S. et al.	2017	Artigo de Revista	Investigar características de resistência da pasta de cimento em modelos de estopes similares	Estudo experimental sobre as características de resistência de rejeitos cimentados em estopes.

**Fonte:** Da Autora (2024)