UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

GIOVANNA BECHARA CARRARA

Gestão sustentável de resíduo de bauxita:
Avaliação das alternativas tecnológicas à disposição úmida em barragens

Sorocaba
2026

GIOVANNA BECHARA CARRARA

Gestão sustentável de resíduo de bauxita:
Avaliação das alternativas tecnológicas à disposição úmida em barragens

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini

Sorocaba
2026

C313g

Carrara, Giovanna Bechara
Gestão sustentável de resíduo de bauxita : avaliação das alternativas tecnológicas à disposição úmida em barragens / Giovanna Bechara Carrara. -- Sorocaba, 2026
59 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Sandro Donnini Mancini

1. Lama vermelha. 2. Barragens de rejeitos. 3. Óxido de alumínio. 4. Alumínio - Indústria. 5. Economia circular. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

GIOVANNA BECHARA CARRARA

Gestão sustentável de resíduo de bauxita:

Avaliação das alternativas tecnológicas à disposição úmida em barragens

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data da defesa: 10/09/2026

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

_____

Profa. Dra. Carolina Gil Garcia
UNESP - Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

_____

Engenheiro Alex Cruz Figueiredo
Prefeitura Municipal de Jundiaí / PPG Eng Civil e Ambiental da Unesp

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador, por todo o apoio, dedicação e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para a conclusão deste projeto.

Agradeço também ao meu companheiro, aos meus familiares e amigos, pelo incentivo, compreensão e suporte durante toda essa jornada acadêmica. Além disso, sou grata à todos da minha equipe do trabalho, por esclarecerem minhas dúvidas e estarem à disposição quando eu precisei.

Por fim, estendo meus agradecimentos à todos os professores, coordenação do curso, servidores técnico-administrativos da Universidade, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica e para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

O alumínio é um metal produzido em larga escala mundial, e o Brasil é referência no ramo, tanto pelas suas reservas de matéria-prima (bauxita) quanto pela própria cadeia produtiva do alumínio. No processo do refino da bauxita, a fim de se obter a alumina que posteriormente se tornará o alumínio metálico, gera-se uma vasta quantidade de resíduo denominado lama vermelha. Em virtude desse passivo ambiental, o presente trabalho estrutura uma análise crítica comparativa entre os métodos de disposição desse resíduo sob a perspectiva da gestão sustentável, considerando aspectos relacionados à segurança operacional, aos impactos socioambientais, à recuperação de recursos e ao potencial de reaproveitamento da lama vermelha. A crescente preocupação com a segurança de barragens de resíduos e com a redução dos impactos ambientais associados tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias alternativas para a disposição a seco da lama vermelha. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e exploratório, fundamentada em artigos científicos, teses, notícias, normas técnicas e legislações nacionais pertinentes ao tema. Os resultados evidenciaram que as barragens convencionais apresentam limitações e uma série de desvantagens. Em contrapartida, verificou-se que tecnologias como a filtragem e o empilhamento a seco proporcionam vantagens quanto à economia circular e à redução dos impactos socioambientais da atividade. Entretanto, sua implementação ainda depende da superação de desafios relacionados às particularidades de cada empreendimento. Em suma, as tecnologias de desaguamento representam uma alternativa mais sustentável à disposição convencional em barragens, favorecendo uma gestão mais segura, eficiente e ambientalmente responsável dos resíduo de bauxita.

Palavras-chave: alumínio; lama vermelha; resíduo de bauxita; barragem de resíduos; disposição a seco; economia circular.

ABSTRACT

Aluminum is a metal produced on a large scale worldwide, and Brazil is a leading country in this sector due to both its abundant bauxite reserves and its well-established aluminum production chain. During the refining of bauxite to obtain alumina, which is subsequently converted into metallic aluminum, a large amount of waste known as red mud is generated. Given the environmental liability associated with this residue, the present study presents a comparative critical analysis of the main disposal methods from the perspective of sustainable management, considering aspects related to operational safety, socio-environmental impacts, resource recovery, and the potential for red mud reuse. Growing concerns regarding the safety of tailings dams and the need to reduce the environmental impacts associated with mining have driven the development of alternative technologies for the dry disposal of red mud. To achieve this objective, a qualitative and exploratory literature review was conducted, based on scientific articles, theses, news reports, technical standards, and Brazilian legislation relevant to the subject. The results showed that conventional tailings dams present several limitations and disadvantages. In contrast, technologies such as filtration and dry stacking provide significant advantages regarding circular economy practices and the reduction of the socio-environmental impacts associated with the activity. However, their implementation still depends on overcoming challenges related to the specific characteristics of each operation. In summary, dewatering technologies represent a more sustainable alternative to conventional tailings dam disposal, promoting safer, more efficient, and environmentally responsible management of bauxite residues.

Keywords: aluminum; red mud; bauxite residue; tailings dams; dry stacking; circular economy..

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aspecto do minério de bauxita 14

Figura 2 - Esquemas das etapas da produção do alumínio 15

Figura 3 - Aspecto de lingotes de alumínio 15

Figura 4 - Diagrama de insumos, produtos e subprodutos do Processo Bayer 19

Figura 5 - Processo Bayer Alunorte 21

Figura 6 - Métodos construtivos (alteamentos) 26

Figura 7 - Barragem de lama vermelha da CBA, onde é possível ver os alteamentos a jusante 28

Figura 8 - Vista de parte da catástrofe da barragem do Fundão da mineradora Samarco no município de Mariana (MG) em 2015. 29

Figura 9 - Vista de parte do desastre de Brumadinho, ocorrido em 2019 29

Figura 10 - Lama vermelha exposta à secagem natural para posterior disposição final 39

Figura 11 - Vista de um dos Filtros-Prensa da CBA 41

Figura 12 - Vista externa do galpão onde estão localizados os filtros-prensa da CBA 41

Figura 13 - Fluxo de critérios para escolha da tecnologia 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking das reservas de bauxita no mundo em 2024 16

Tabela 2 - Ranking produções no mundo em 2024 17

Tabela 3 - Minerais de alumínio presentes na bauxita 20

Tabela 4 - Composição química típica da lama vermelha 22

Tabela 5 - Composição mineralógica típica da lama vermelha 23

Tabela 6 - Resumo comparativo entre os principais métodos construtivos 42

Tabela 7 - Resumo comparativo entre os principais métodos de disposição 45

Tabela 8 - Comparação de Impactos socioambientais entre as tecnologias de disposição 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CRI	Categoria de Risco
DPA	Dano Potencial Associado
EPA	Environmental Protection Agency
ESG	Environmental, Social and Governance
HBF	Hyperbaric Filter
IAI	International Aluminium Institute
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Renováveis
LV	Lama Vermelha
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RB	Resíduo de bauxita
TDB	Tailings Dry Backfill
TTD	Thickened Tailings Disposal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **11**

2 OBJETIVOS **13**
2.1 Objetivo Geral 13
2.2 Objetivos específicos 13

3 REVISÃO DA LITERATURA **14**
3.1 Mineração da bauxita e produção de alumínio 14
3.2 Processo Bayer 19
3.3 Caracterização do resíduo 22
3.4 Disposição convencional em barragens 25
3.4.1 Barragem de resíduo 25
3.4.2 Legislação aplicável 28
3.5 Economia circular e reaproveitamento 31

4 MATERIAL E MÉTODO **34**
4.1 Caracterização da pesquisa 34
4.2 Estratégia de busca bibliográfica 34
4.3 Seleção e análise dos estudos 36
4.4 Critérios de comparação das tecnologias 36

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES **38**
5.1 Tecnologias alternativas à disposição em barragens 38
5.2 Análise crítica das tecnologias de disposição de resíduo de bauxita sob a perspectiva da gestão sustentável 42
5.2.1 Comparação entre os métodos construtivos de barragens de resíduo 42
5.2.2 Avaliação comparativa das tecnologias alternativas de disposição 45

6 CONCLUSÕES **51**

7. REFERÊNCIAS **53**

1 INTRODUÇÃO

A exploração de recursos naturais está presente em cada passo do nosso dia a dia, seja no papel que usamos, na roupa que vestimos ou na embalagem do leite que colocamos em nosso café. E há alguns anos, esse tópico se tornou de extrema relevância e mundialmente falado, à medida que grande parte desses recursos é finita ou suas explorações acarretam uma série de impactos negativos à natureza ou ao próprio ser humano.

A mineração é um grande exemplo disso, sendo uma das atividades que mais degradam o meio ambiente. No entanto, concomitante a isso, é considerada fonte para a economia, principalmente no Brasil, um país tão rico em matérias-primas.

As atividades posteriores à mineração, neste caso, a produção em indústrias para geração de produtos finais a partir desses minérios extraídos da Terra, proporcionam recursos essenciais para a sobrevivência da sociedade nos dias de hoje. Deste modo, é necessário caminhar lado a lado a esses setores, garantindo as conformidades legais para que acidentes não ocorram, pessoas não sejam afetadas, somente beneficiadas. E que alternativas tecnológicas para a mitigação de impactos ambientais sejam cada vez mais aplicadas e se tornem referência para o mercado

O Brasil é o terceiro país produtor de bauxita e um dos maiores produtores de alumínio. E, por consequência, também grande gerador de rejeitos de mineração e do processo industrial da refinaria de alumina. Como ponto de atenção é trazido esta etapa de beneficiamento da bauxita, no qual produz-se a alumina pelo determinado processo Bayer; a alumina será posteriormente utilizada como principal matéria prima para a produção do alumínio metálico.

O alumínio é o 3° elemento mais abundante na crosta terrestre e o metal mais jovem a ser usado em escala industrial. A produção brasileira de bauxita alcançou 35.321,2 milhões de toneladas em 2024, e a de alumina cresceu 1,5% no mesmo ano, atingindo 10.620,6 milhões de toneladas. Já o próprio alumínio primário obteve 1,1 milhão de toneladas, um aumento de 8,8%, colocando o Brasil em 9ª posição mundial da produção do metal. Esses dados trazem a grandeza do impacto do resíduo de bauxita, sendo que com 4 toneladas de bauxita produzem-se 2 de alumina e, com essas 2 toneladas gera-se apenas 1 tonelada de alumínio primário (ABAL, 2026).

O processo Bayer tem especialmente a lama vermelha (LV) como resíduo gerado e toda a sua problemática envolvida. Uma vez que sua disposição final normalmente é realizada em barragens de resíduo e que, além do elevado volume de resíduo gerado para disposição, também traz relevantes impactos socioambientais devido ao método de disposição e características do resíduo.

Uma barragem é uma construção civil projetada para interromper o fluxo de determinada substância, atuando como uma barreira. Esses reservatórios são desenvolvidos para diversas funções e atividades, como por exemplo, armazenar água para consumo (humano, industrial ou agrícola), geração de energia, navegabilidade e até a disposição de resíduo que não apresentam mais utilidade e precisam de uma destinação segura; como é o caso da lama vermelha.

As barragens têm grande importância, trazendo algumas soluções, mas também apresentam riscos significativos. Por isso, é de extrema relevância que haja o correto manejo, projeto, construção, manutenção e medidas de controle.

Desastres envolvendo barragens de rejeitos, como os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e de Brumadinho (2019), evidenciaram os riscos associados a essas estruturas e reforçaram a necessidade de aprimorar sua gestão e segurança. Em que pese que essas barragens eram para abrigar rejeitos da mineração de hematita (para futura obtenção do ferro), esses acidentes desencadearam uma resposta do setor de mineração em geral. Diversos países passaram a fortalecer a regulamentação sobre projeto, operação e manutenção de barragens, além de incentivar o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento e reaproveitamento de resíduo, visando reduzir a dependência dessas estruturas e minimizar seus impactos ambientais (Rocha, 2021).

Deste modo, o objetivo desse trabalho de conclusão de curso é trazer o contexto da geração da lama vermelha, a caracterização e classificação desse resíduo, bem como discutir o método convencional e os métodos alternativos para a disposição desse resíduo de bauxita. Além disso, avaliar as tecnologias de reaproveitamento da lama vermelha na transformação de outros produtos para o mercado. Isso possibilitará uma visão crítica e necessária sobre todo o contexto, uma vez que esse assunto vem sendo uma questão mundial e com ampla atenção. Isso se dá, em especial, após acidentes que ocorrerem, novas legislações que vêm sendo alteradas, bem como pela necessidade de minimizar ou mitigar impactos ambientais e sociais associados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho de conclusão de curso visa avaliar alternativas tecnológicas para a gestão sustentável dos resíduos de bauxita.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar a caracterização típica da lama vermelha e seu processo de geração;
- Apresentar o método convencional de disposição e os principais riscos socioambientais associados;
- Analisar tecnologias alternativas para disposição do resíduo de bauxita;
- Avaliar possibilidades de reaproveitamento da lama vermelha para novos produtos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Mineração da bauxita e produção de alumínio

A mineração de bauxita desempenha grande importância mundial, uma vez que a partir dela obtém-se a matéria-prima essencial para a produção de uma das commodities mais utilizadas no mundo: o alumínio. Este metal não ferroso, leve e versátil vem conquistando seu espaço no mercado há algumas décadas, e a tendência é continuar em ascensão. E segundo a Associação Brasileira de Alumínio (2022), sua ampla aplicabilidade no mercado, desde transporte e automotivos até embalagens, deve-se ao fato de suas características que trazem diversas vantagens quando comparadas à outros materiais; como baixa densidade, fácil transformação, durabilidade, resistência à corrosão e reciclabilidade (Cardoso et. al., 2011).

Segundo Santos e Silva (2020), o alumínio é o terceiro elemento mais presente na crosta da Terra, porém não em sua forma final, mas como seu elemento substancial que é a bauxita, cujo aspecto é apresentado na Figura 1. Essa matéria prima valiosa, encontrada na superfície da Terra ou em camadas de rochas sedimentares denominadas argilas bauxíticas, são comumente mineradas a céu aberto e cerca de 85% de sua extração é destinada à produção de alumínio, enquanto o restante destina-se à produção de cimento, cerâmica e outras.

Figura 1 – Aspecto do minério de bauxita

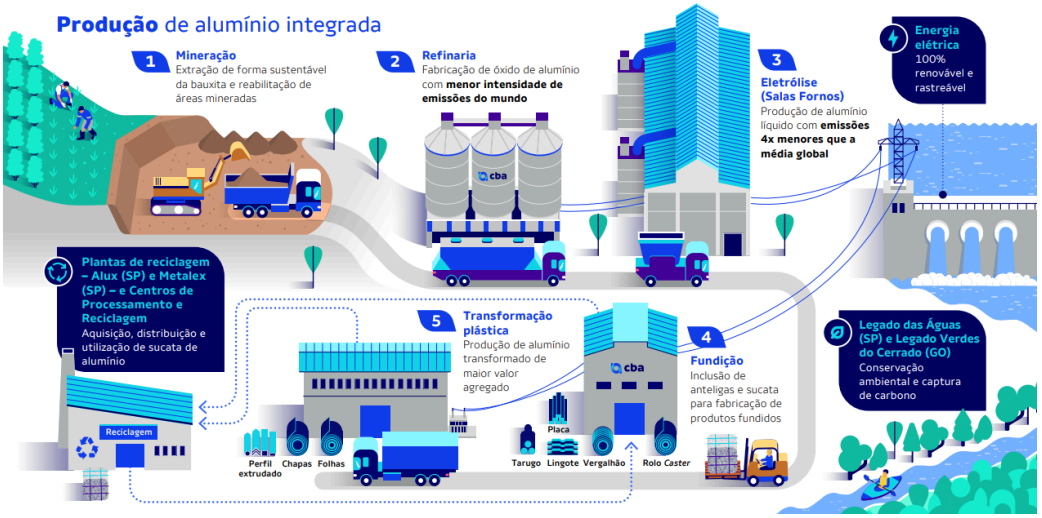


Fonte: Companhia Brasileira de Alumínio, 2026

Para a bauxita se tornar o alumínio metálico desejado, há uma série de processos de transformação. O primeiro passo é a mineração, onde a bauxita é extraída do solo. Em seguida o mineral extraído inicia seu processo industrial passando pela refinaria de alumina, se transformando em óxido de alumínio. Posteriormente o óxido de alumínio passa pela redução eletrolítica virando o alumínio metálico líquido. E por fim a fundição do alumínio líquido em alumínio metálico primário, pronto para o mercado; podendo ou não passar pela transformação plástica como quinta etapa a fim de gerar maior valor agregado (CBA, 2026).

A Figura 2 demonstra o processo produtivo integrado, ou seja, da mineração até a transformação plástica do alumínio e a Figura 3 apresenta o aspecto de um dos principais produtos primários obtidos, o lingote.

Figura 2 – Esquema das etapas da produção do alumínio



Fonte: Companhia Brasileira de Alumínio, 2026

Figura 3 – Aspecto de lingotes de alumínio



Fonte: Hydro, 2026

De acordo com a ABAL (2025), o Brasil está entre as maiores reservas de bauxita do mundo, e estas contêm um minério de excelente qualidade. Entre os principais países produtores de bauxita estão a Guiné, líder mundial, seguida da Austrália, China e em quarto lugar o Brasil. Algumas explicações podem ser dadas como justificativa do sucesso desses países quanto a esta atividade; desde grandes extensões de terra e recursos disponíveis para mineração até ligação à importantes rotas marítimas, visando exportação (Harbor Aluminum, 2025)

O Brasil não é só um dos países com maior reserva de bauxita do mundo (Tabela 1), mas também é um grande produtor da própria alumina, que é a matéria prima antecedente ao alumínio metálico. Isso representa a cadeia completa e traz muita vantagem competitiva para o país e sua economia, uma vez que ocupa a terceira colocação no ranking de produção mundial. Já no que diz respeito à fabricação de alumínio, o Brasil ocupa a nona posição (Tabela 2), o que também é bastante significativo (ABAL, 2025). Mesmo sendo o terceiro país com maior produção de alumina não está entre os primeiros na produção de alumínio primário, pois cerca de 90% da alumina produzida é exportada (Times Brasil, 2025).

Tabela 1 - Ranking das reservas de bauxita no mundo em 2024

RESERVAS DE BAUXITA		
Ranking	**Países**	**Volume (milhões de toneladas)**
1°	Guiné	7.400

2°	Austrália	3.500
3°	Vietnã	3.100
4°	Indonésia	2.800
5°	**Brasil**	**2.700**
6°	Jamaica	2.000
7°	China	680
8°	Índia	650
9°	Rússia	480
10°	Cazaquistão	280
	outros	5.410
Total		**29.000**

Fonte: Adaptado de ABAL (2025)

Tabela 2 - Ranking produções no mundo em 2024

PRODUÇÃO (mil toneladas)						
Ranking	**Bauxita**	**Volume**	**Alumina**	**Volume**	**Alumínio Primário**	**Volume**
1°	Guiné	130.000	China	84.000	China	43.000
2°	Austrália	100.000	Austrália	18.000	Índia	4.200
3°	China	93.000	**Brasil**	**10.621**	Rússia	3.800
4°	**Brasil**	**35.321**	Índia	7.600	Canadá	3.300
5°	Indonésia	32.000	Rússia	2.900	Emirados Árabes Unidos (UAE)	2.700
6°	Índia	25.000	Emirados Árabes Unidos (UAE)	2.400	Bahrein	1.600
7°	Rússia	6.300	Arábia Saudita	1.800	Austrália	1.500
8°	Jamaica	6.100	Irlanda	1.600	Noruega	1.300

9°	Arábia Saudita	5.800	Canadá	1.500	**Brasil**	**1.109**
10°	Cazaquistão	4.900	Jamaica	1.500	Malásia	870
	outros	11.579	outros	10.079	outros	8.621
Total		**450.000**		**142.000**		**72.000**

Fonte: Adaptado de ABAL (2025)

Todavia, cada refinaria que hoje opera no mundo carrega o encargo de todo o passivo gerado por essa atividade. Ainda, há o dever de atuar com responsabilidade e práticas ambientalmente corretas, a fim de preservar o meio ambiente e as comunidades ao seu entorno. Os grandes países que são palcos dessas refinarias são Austrália, Brasil, China, Índia e Rússia; e isto mostra a grande diversidade entre países, continentes, regiões e tecnologias; e que apesar disso possuem um enorme denominador comum (ABAL, 2025).

No Brasil, há três enormes refinarias mundialmente conhecidas: Hydro Alunorte, em Barcarena/PA; Alumar (Alcoa), em São Luís/MA; e Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Alumínio/SP. Todas em contextos ambientais distintos, sendo a Alunorte próxima ao Rio Tocantins e em região de floresta amazônica, a Alumar com proximidade ao mar e área de manguezais (Baía de São Marcos) e a CBA integrada à zona urbana (Vendrasco, 2025).

O processo produtivo do alumínio é responsável pela geração de um resíduo bastante problemático chamado “Lama Vermelha”, ou resíduo de bauxita; alvo do presente trabalho de conclusão de curso. De acordo com a cadeia de produção do alumínio, ocorrem uma série de etapas até que a bauxita vire o metal prateado comumente conhecido e utilizado. Contudo, o processo foco deste estudo é o do beneficiamento da bauxita pelas refinarias de alumina. E é nesse processo que a bauxita proveniente da mineração do solo se torna a alumina (óxido de alumínio).

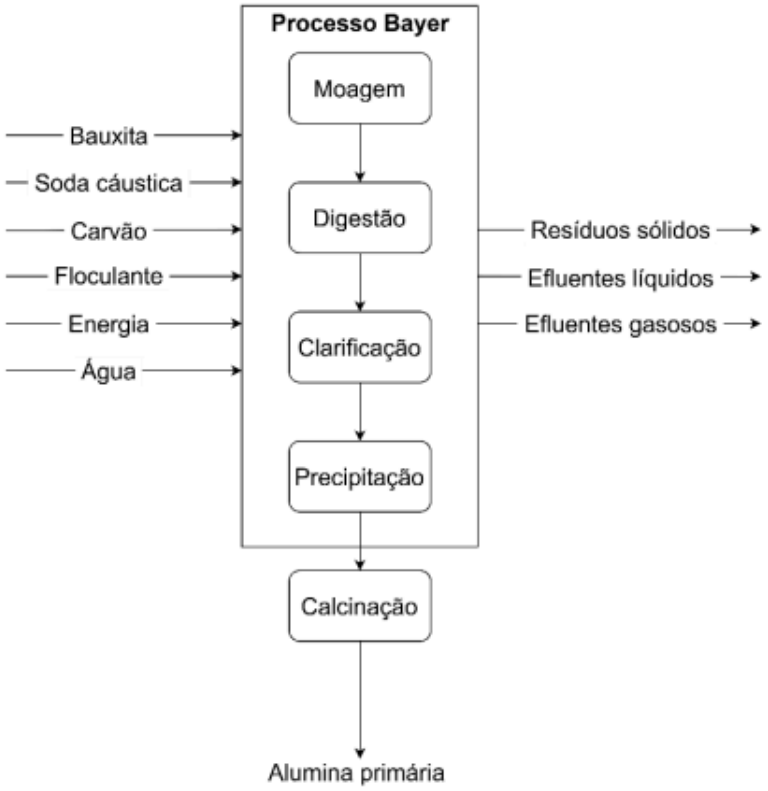
O beneficiamento da bauxita ocorre pelo denominado Processo Bayer. Nele reações químicas e físicas ocorrem até que o minério se transforme, dividindo-se em lama vermelha (resíduo) e alumina (matéria-prima efetiva para o alumínio metálico). Ao final do processo, após o conjunto de interesse ser retirado da bauxita, resta apenas o seu resíduo que deve seguir para disposição final, convencionalmente

realizada em barragens, mas propícia a outras alternativas que visam mitigar os impactos ambientais e sociais provenientes desse resíduo (Silva Filho et al., 2007).

3.2 Processo Bayer

Em 1888, Karl Josef Bayer patenteou o então denominado Processo Bayer, o qual dá origem à alumina a partir da bauxita. Este método apresenta notória eficiência, por isso, desde então, tornou-se o principal processo industrial no mundo (Lumley, 2011). Este é baseado na diferença de solubilidade entre os minerais de alumínio e as demais fases minerais da bauxita quando submetidos à ação de uma solução concentrada de hidróxido de sódio (NaOH), permitindo a separação da alumina dos constituintes insolúveis do minério (Silva Filho et al., 2007).

Figura 4 - Diagrama de insumos, produtos e subprodutos do Processo Bayer



Fonte: Vendrasco, 2025

De início, a fim de reduzir a granulometria do minério e aumentar a eficiência das etapas seguintes de processamento, a bauxita extraída é submetida à britagem

e moagem. Em seguida, encaminha-se o material para a etapa de digestão, considerada uma das fases mais importantes do processo Bayer. Nessa etapa, a bauxita é misturada com solução concentrada de soda cáustica sob condições controladas de temperatura e pressão, promovendo a dissolução dos minerais portadores de alumínio e formando uma solução rica em aluminato de sódio (Silva Filho et al., 2007).

A composição mineralógica da bauxita pode alterar as condições operacionais da digestão. Comumente, são necessárias 4 toneladas de bauxita para produzir 2 toneladas de alumina (ABAL, 2026). Minérios ricos em gibbsita, predominantes nos depósitos brasileiros, são processados em temperaturas mais baixas, geralmente entre 140 °C e 150 °C e fornecem menor percentual de alumina (cerca de 65%). Já bauxitas com maiores concentrações de boehmita e diásporo necessitam de temperaturas mais elevadas, próximas de 250 °C, para que ocorra a dissolução adequada da alumina, o que ocorre em proporções maiores, até 85%, conforme pode ser observado na Tabela 3 (Van Deursen, 2016; Palomino, 2017).

Tabela 3 - Minerais de alumínio presentes na bauxita

Mineral	**Fórmula Química**	**% Al2O3**	**Massa específica (t/m³)**
Gibbsita	Al2O3.3H2O Al(OH)3 y-Al(OH)3	65,36	2,3 - 2,4
Boehmita	Al2O3.H2O AlO(OH) y-AlO(OH)	84,98	3,0 - 3,07
Diásporo	Al2O3.H2O AlO(OH) α-AlO(OH)	84,98	3,3 - 3,5

Fonte: Silva, 2020

A mistura proveniente da etapa de digestão é direcionada à etapa de clarificação, na qual ocorre a separação entre a solução contendo aluminato de sódio e os materiais insolúveis remanescentes. Para isso, são empregados

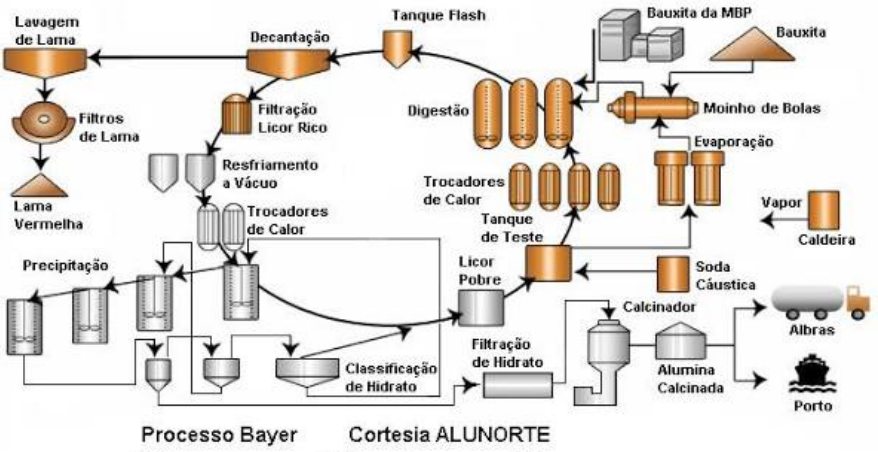
processos de sedimentação, decantação e filtração, frequentemente associados ao uso de agentes floculantes. Durante essa etapa, os sólidos insolúveis são separados e encaminhados para sistemas de lavagem, visando recuperar parte da soda cáustica utilizada no processo, que posteriormente é reutilizada na própria refinaria (Palomino, 2017).

O resíduo sólido gerado na clarificação é a denominada lama vermelha ou resíduo de bauxita. Este resíduo representa o principal resíduo gerado no processo Bayer e seu volume é expressivo, tornando sua gestão um dos maiores desafios ambientais da indústria de alumina. Ademais, esse material apresenta elevada alcalinidade devido à presença residual de soda cáustica, característica que exige cuidados específicos durante seu armazenamento, transporte e disposição final (Palomino, 2017).

O resultado da elevada concentração de óxidos de ferro, embora sua composição também inclua óxidos de alumínio, sílica, dióxido de titânio e outros minerais presentes na bauxita original, atribuí a característica da coloração vermelha da lama. A composição química deste resíduo pode variar de acordo com a origem geológica do minério e com as condições operacionais empregadas durante o beneficiamento (Silva Filho et al., 2007).

Para a finalização do processo, após a remoção dos sólidos insolúveis, o licor rico em aluminato de sódio é resfriado e recebe sementes de gibbsita, favorecendo a precipitação do hidróxido de alumínio. Esse material é posteriormente lavado e encaminhado para a etapa de calcinação, onde é aquecido a temperaturas próximas de 1.000 a 1.100 °C. Durante esse processo ocorre a eliminação da água de hidratação, resultando na formação da alumina (Al_2O_3), matéria-prima utilizada na produção de alumínio metálico pelo processo Hall-Héroult (Gancev, 2009; Palomino, 2017). Um resumo do processo Bayer utilizado pela Alunorte é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Processo Bayer Alunorte



Fonte: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2008

3.3 Caracterização do resíduo

A lama Vermelha (Red Mud), ou também conhecida como resíduo de bauxita, proveniente do processo Bayer para geração da alumina, é constituída por partículas muito finas. Apresenta uma elevada área específica de 10 a 31 m²/g, com tamanho de sua partícula em uma ampla faixa granulométrica de 0,1 a 160 µm (Sahu & Patel, 2016). Uma das suas principais características é ser altamente alcalina, com pH em torno de 10 a 13. Isto se dá pela digestão da bauxita com soda cáustica (NaOH), e mesmo que ocorram posteriores etapas de lavagem do material para diminuição desse teor, o resíduo final ainda apresenta elevado pH.

Ainda para a caracterização física, outro fator relevante é o teor de umidade da lama, que fica em torno de 60% e 80% (IAI, 2025). Já a composição química do resíduo pode variar a depender da origem do mineral, ou seja, da natureza da jazida de bauxita, e dos procedimentos e técnicas adotados pela indústria, no caso, as refinarias de alumina.

Contudo, fazem parte de seus componentes principais os óxidos de ferro, alumínio, sílica, sódio, cálcio e titânio (Tabela 4). Alguns elementos-traço como os óxidos de vanádio, gálio, fósforo, manganês, magnésio, zinco, tório, cromo e nióbio também podem ser encontrados. Já entre as fases minerais geralmente vistas estão a hematita, goethita, magnetita, boehmita, quartzo, sodalita e gipsita, enquanto em menor frequência, a calcita e gibbsita, conforme apresentado na Tabela 5 (Silva Filho et al., 2007; Sahu, et al., 2010).

Tabela 4 - Composição química típica da lama vermelha

Compostos	% em peso (base seca)
Fe_2O_3	5 - 60
Al_2O_3	5 - 30
SiO_2	3 - 50
TiO_2	0,3 - 15
CaO	2 - 14
Na_2O	1 - 10

Fonte: Adaptado de World Aluminium, 2020

Tabela 5 - Composição mineralógica típica da lama vermelha

Compostos	% em peso (base seca)
Sodalita ($3Na_2O.3Al_2O_3.6SiO_2.Na_2SO_4$)	4 - 40
Goethita ($FeOOH$)	10 - 30
Hematita (Fe_2O_3)	10 - 30
Magnetita (Fe_3O_4)	0 - 8
Sílica (SiO_2)	3 - 20
Aluminato de Cálcio ($3CaO.Al_2O_3.6H_2O$	2 - 20
Boemita ($AlOOH$)	0 - 20
Dióxido de Titânio (TiO_2)	2 - 15
Muscovita ($K_2O.3Al_2O_3.6SiO_2.2H_2O$)	0 - 15
Calcita ($CaCO_3$)	2 - 20
Caolinita ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$)	0 - 5

Gibbsita ($Al(OH)_3$)	0 - 5
Perovskita ($CaTiO_3$)	0 - 12
Cancrinita ($Na_6[Al_6Si_6O_{24}].2CaCO_3$)	0 - 50
Diásporo ($AlOOH$)	0 - 5

Fonte: Adaptado de World Aluminium, 2020

Além disso, a qualidade da bauxita utilizada influencia diretamente na quantidade de lama vermelha gerada. Na média, a proporção se dá por uma tonelada de alumina produzida, uma a duas toneladas de lama são geradas. Deste modo, quanto mais rica em alumínio for essa bauxita e menos impurezas tiver (demais minérios e substâncias), uma menor quantidade de resíduo é produzido. O mesmo princípio pode ser observado para a bauxita e o óxido, no qual tem-se por média um rendimento de 0,5; para cada tonelada de alumina produzida, são necessárias em média de 2 a 3 toneladas de bauxita, a depender da pureza do material (ABAL, 2026).

A lama vermelha é um resíduo muito característico, tanto por sua cor quanto pelo seu cheiro; sendo similar visualmente à lama/barro. Segundo a United States Environmental Protection Agency (EPA, 2005), este resíduo não é considerado perigoso, e entra em uma categoria de vinte resíduos de processamento mineral qualificados para exclusão do regulamento federal para resíduos perigosos.

De acordo com a NBR 10.004/2024 o resíduo de bauxita é classificado como classe II - não perigosos (ABNT, 2024). No entanto, essa classificação pode depender da composição do resíduo. Afinal, as origens e os processos pelos quais a bauxita passa até ser gerada a lama vermelha variam muito de indústria para indústria, e pode sim chegar a ser classificado como um resíduo perigoso; principalmente por conta da alcalinidade, devido à quantidade de soda cáustica presente.

Um grande ponto levantado é que alguns processos alternativos ou até complementares à simples disposição desse resíduo de bauxita, podem corroborar para a perda da sua caracterização como “lama vermelha” e se tornar um resíduo

menos agressivo. Como é o caso da lavagem do material; o qual consegue reduzir o pH do resíduo podendo chegar a 8.

3.4 Disposição convencional em barragens

3.4.1 Barragem de resíduos

A maioria dos resíduo de mineração e dos resíduos de processos industriais, como é o caso da lama vermelha, não possui um valor atrativo economicamente. Sendo assim, são dispostos necessariamente em um local para armazenamento temporário ou permanente. Ou em raras exceções, destinam-se para o reaproveitamento, onde serão usados como alternativa para produção de um novo material. Tendo isso em vista, os barramentos são os métodos mais utilizados (Alves, 2020).

Em 1970, caiu em desuso a disposição em alto-mar, a qual até os anos 60 era uma das formas mais utilizadas. A partir dos anos 1970, não houve a construção de mais nenhuma refinaria de alumina que visasse à disposição em alto-mar. Neste método, o resíduo de bauxita é transferido para uma tubulação, após o recebimento de tratamento para redução dos teores cáusticos, e desaguado em alto-mar (IAI, 2018).

Estudos realizados pelo International Aluminium Institute (IAI) e pela Associação Europeia de Alumínio, publicados em 2015, mostraram que, mesmo com o elevado potencial de impacto previsto, foram observados poucos efeitos adversos nas áreas de estudo, sendo elas o Mar Mediterrâneo e o Oceano Pacífico, para o meio ambiente marinho local. No entanto, essa técnica ainda era acompanhada de uma série de preocupações com os possíveis danos ambientais.

Segundo Silva et al. (2007), na atualidade a disposição dos resíduo de bauxita são realizadas em lagoas projetadas para armazenamento deste resíduo de maneira que não haja contato externo, ou seja, não haja dispersão e, por consequência, contaminações. Este método também denominado de disposição úmida, pois há um grande volume de água envolvida que segue juntamente com o material sólido à disposição. Nesta metodologia, naturalmente ocorre uma separação das fases, com a sedimentação da fase

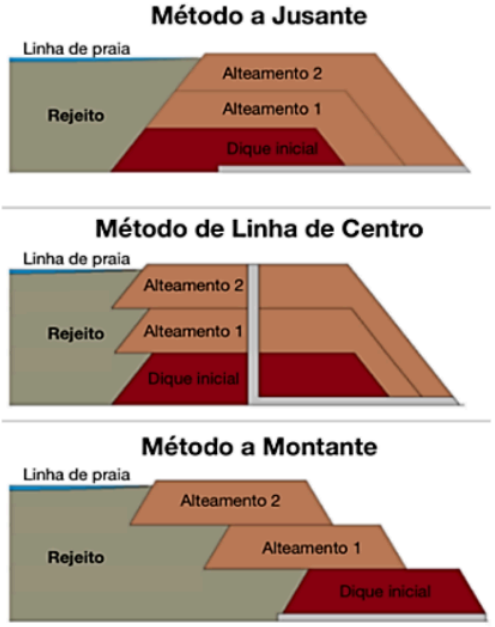
sólida e permanência de um sobrenadante alcalino que pode ser reencaminhado para o processo na refinaria, reaproveitando-o.

A operação é simples e barata, no entanto o risco é muito alto. O vazamento desse resíduo pode afetar de diversas formas negativamente o meio ambiente e a população em seu entorno. Por conta disso, tecnologias de barramentos foram desenvolvidas para que esses passivos ambientais fossem depositados e lá permanecessem por décadas. Além disso, são demandadas extensas áreas o que associa-se a custos mais elevados, pois são necessárias impermeabilizações, instrumentos e equipe de monitoramento e muitos estudos de impactos.

Há três metodologias construtivas para a realização de uma barragem de resíduo: a jusante, a montante e linha de centro (Figura 9). Por todos os métodos há a construção de um dique inicial sob uma fundação. No entanto, são os alteamentos, que são construídos ao longo do tempo de acordo com a quantidade de resíduo gerado a ser destinado, que vão diferenciá-las. No método a jusante, os alteamentos são feitos todos sob o dique e para “fora” do resíduo. Já no método a montante, ocorre exatamente o contrário; todos os alteamentos são realizados do dique inicial para cima do resíduo. E no método da linha de centro, ocorre ambos os métodos, então um alteamento é construído de jusante até a montante do resíduo.

Vale ressaltar, que após os rompimentos das barragens de Mariana e Brumadinho, as quais foram alteadas pelo método construtivo a montante, a Agência Nacional de Mineração (ANM) por meio da Resolução nº 04/2019 trouxe a proibição deste método no Brasil (ANM, 2019). Com isso, veio a Lei Federal nº 14.066/2020 a qual obriga que todas as barragens construídas pelo método a montante fossem descaracterizadas até 25 de fevereiro de 2022 (Planalto, 2020). Este e outros aspectos legislativos relacionados serão abordados no item 3.4.2.

Figura 6 - Métodos construtivos (alteamentos)



Fonte: Cardoso et al., 2019

Outra questão civil impactante para as obras de barragens é a escolha do material para a construção desse barramento. Este pode diferenciar entre concreto, rochas, solos com areia ou o próprio resíduo. Entretanto, a escolha do método vai depender das características condicionantes do projeto de topografia, hidrologia, propriedades do solo, granulometria, geologia, concentração do resíduo, vazão de disposição, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, compactação e equipes de controle (Soares, 2010).

Para a conformidade legal e o alcance da maior segurança possível de uma barragem, um plano de segurança de barragem deve ser adotado. Para isso, é necessário seguir diversos critérios; como a implantação de equipamentos que auxiliam no monitoramento de nível, que vão dizer se houve ou não algum deslocamento ou abalo na estrutura, assim como os equipamentos chamados inclinômetros. Além disso, os piezômetros e medidores de nível da água, pelos quais observa-se a presença ou não de água, ou seja, dispersões indevidas pela barragem. E um último exemplo seria o sistema de alerta de segurança, que são as câmeras e sirenes integradas ao equipamentos e que têm a função de comunicar a emergência para a região (PNSB, 2010).

Figura 7 - Barragem de lama vermelha da CBA, onde é possível ver os alteamentos a jusante



Fonte: Prefeitura de Sorocaba, 2019

3.4.2 Legislação aplicável

Partindo do objetivo de minimizar os impactos ambientais, garantir a estabilidade das estruturas de contenção e proteger a população e os recursos naturais, a gestão dos rejeitos provenientes da mineração de bauxita está inserida em um conjunto de normas ambientais, minerárias e de segurança de barragens. Nas últimas décadas, o Brasil passou por importantes alterações em sua legislação, fortalecendo os mecanismos de fiscalização, monitoramento e gerenciamento de barragens de mineração. Isto especialmente após os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019) (Brasil, 2020; ANM, 2022).

Figura 8 – Vista de parte da catástrofe da barragem do Fundão da mineradora Samarco no município de Mariana (MG) em 2015.



Fonte: Agência Senado, 2020

Figura 9 – Vista de parte do desastre de Brumadinho, ocorrido em 2019.



Fonte: CNN Brasil, 2024

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) é a principal legislação sobre o tema. Essa lei estabelece diretrizes para o planejamento, construção, operação, monitoramento e desativação de barragens destinadas à acumulação de água, à disposição de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Além disso, determina que o empreendedor é responsável pela elaboração do Plano de Segurança da Barragem

(PSB), pela realização de inspeções regulares e pela elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido (Brasil, 2010).

No contexto do rompimento da barragem de Brumadinho, confirmou-se a necessidade de aperfeiçoamento da legislação vigente. Em 30 de setembro de 2020 foi sancionada a Lei nº 14.066. Estão entre as principais mudanças a proibição da construção e do alteamento de barragens pelo método construtivo a montante e a obrigatoriedade da descaracterização das barragens já existentes construídas desse modo. Além disso, foram fortalecidas as exigências relacionadas ao monitoramento, à transparência das informações e à responsabilização dos empreendedores. Tendo isso em vista, a nova lei alterou dispositivos da Política Nacional de Segurança de Barragens, tornando mais rigorosos os critérios de fiscalização e gestão dessas estruturas (Brasil, 2020).

No setor mineral, compete à Agência Nacional de Mineração (ANM) regulamentar e fiscalizar as barragens de rejeitos. Atualmente, a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, estabelece os requisitos para a gestão da segurança das barragens de mineração, definindo critérios para classificação das estruturas quanto à Categoria de Risco (CRI) e ao Dano Potencial Associado (DPA), além de disciplinar inspeções de segurança, auditorias técnicas independentes, monitoramento geotécnico e procedimentos para descaracterização das barragens (ANM, 2022).

Além da legislação específica sobre segurança de barragens, a gestão dos resíduo de bauxita deve observar os princípios estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Embora os rejeitos de mineração possuam regulamentação específica, a PNRS estabelece princípios fundamentais para a gestão ambientalmente adequada dos resíduos, como a prevenção da geração, a redução dos impactos ambientais, o incentivo à reutilização e à reciclagem, bem como a adoção dos conceitos de economia circular e desenvolvimento sustentável (Brasil, 2010).

Sob essa perspectiva, estão alinhadas às diretrizes da PNRS as tecnologias que possibilitam a redução do volume de resíduos destinados às barragens. São elas a filtragem, o empilhamento a seco e o reaproveitamento da lama vermelha em materiais de construção civil, cerâmicas e outros produtos industriais. Estas técnicas contribuem para o uso mais eficiente dos recursos naturais e para a diminuição dos

riscos ambientais associados às estruturas convencionais de disposição de resíduos (IBRAM, 2021; ICMM, 2020).

No âmbito do licenciamento ambiental, os empreendimentos minerários, incluindo-se as barragens, também devem atender às exigências estabelecidas pelos órgãos ambientais competentes, em conformidade com a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 237, de 19 de dezembro de 1997, que regulamenta o processo de licenciamento ambiental no Brasil. O monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, o controle de emissões atmosféricas, a recuperação de áreas degradadas, o gerenciamento dos resíduos gerados e o acompanhamento contínuo da estabilidade das barragens durante toda a vida útil do empreendimento e após seu descomissionamento destacam-se entre as condicionantes normalmente exigidas para o empreendimento (CONAMA, 1997).

O Padrão Global para a Gestão Industrial de Rejeitos de Mineração (tradução livre de Global Industry Standard on Tailings Management - GISTM), publicado em 2020 pelo Conselho Internacional de Metais e Mineração (ICMM, na sigla em inglês), pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA/UNEP) e pelos Princípios para o Investimento Responsável (PRI), destaca-se em âmbito internacional. Este documenta boas práticas para a gestão segura de rejeitos, enfatizando governança, transparência, gestão de riscos, monitoramento contínuo e participação das comunidades potencialmente afetadas (ICMM; UNEP; PRI, 2020).

3.5 Economia circular e reaproveitamento

O alumínio é considerado um metal essencial para a transição energética e para a descarbonização global, além de ser infinitamente reciclável sem comprometer suas propriedades físico-químicas, corroborando para a economia circular. Ainda, combina características únicas que o tornam a escolha ideal para um futuro de baixo carbono (CBA, 2025).

A indústria do alumínio desempenha um papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono, uma vez que esse metal é amplamente empregado em setores como construção civil, transporte, embalagens, energia e bens de consumo. Um dos principais exemplos de economia circular nesse segmento é a reciclagem do alumínio, que permite reinserir o material na cadeia produtiva com significativa economia de recursos, consumindo cerca de 5% da

energia necessária para a produção de alumínio primário e reduzindo expressivamente as emissões de gases de efeito estufa (CBA, 2025).

Apesar desses avanços, a aplicação dos princípios da economia circular ainda representa um desafio para os resíduos gerados na etapa de refino da bauxita, especialmente a lama vermelha. Normalmente nas indústrias de alumínio do Brasil, não recebe algum destino de reaproveitamento que não seja a disposição final em barragens de resíduo ou em alguns casos a utilização de um outra tecnologia de disposição concomitantemente (Camilo et. al, 2023).

Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias que promovam seu reaproveitamento e valorização torna-se essencial para reduzir a disposição em barragens, minimizar impactos ambientais e ampliar a sustentabilidade da cadeia produtiva do alumínio (ABAL, 2023). Historicamente a lama vermelha é tratada com um passivo ambiental complexo, e o conceito de economia circular aplicado à indústria de alumínio tem o intuito de transformá-la em uma matéria-prima secundária de valor agregado. Atualmente, a taxa global de reaproveitamento desse resíduo é considerada baixa, situando-se em torno de 4 a 15%, o que impulsiona a busca por tecnologias que permitam sua reinserção em diversas cadeias produtivas (Alves, 2021).

A indústria da construção civil é apontada como um dos setores com maior potencial para absorver grandes volumes de lama vermelha (Ferreira, 2019). No que tange à produção de cimento, o resíduo pode ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de clínquer Portland, sendo tecnicamente viável a adição de até 18%, o que resultaria em um alto consumo do material por tonelada produzida. Por outro lado, o uso como aditivo pozolânico (material rico em sílica e alumina, utilizado para obtenção de concretos de alta durabilidade) puro ainda enfrenta desafios, já que o resíduo nem sempre atende aos requisitos normativos de atividade pozolânica (Montini, 2009).

No campo dos aglomerantes, a ativação alcalina (geopolimerização) surge como uma estratégia sustentável para produzir tijolos e blocos de vedação sem a necessidade de queima ou moagem, resultando em materiais com resistência mecânica satisfatória para alvenaria estrutural. Essa técnica consiste basicamente em uma reação química entre os sólidos do resíduo industrial e os ativadores alcalinos; solução líquida composta por bases fortes, sendo elas silicato de sódio ou

o hidróxido de sódio, que dissolve os óxidos sólidos e se reorganizam formando um gel de aluminossilicato de sódio (Alves, 2021).

Além disso, a substituição parcial de agregados miúdos (areia) por lama vermelha na produção de concreto mostrou resultados positivos, especialmente em teores de 30%, onde se observa um ganho na resistência à compressão (Ferreira, 2019).

Por parte da indústria cerâmica, a incorporação da lama vermelha na cerâmica vermelha é amplamente defendida devido à compatibilidade química entre o resíduo e a argila. Estudos indicam que a utilização de misturas com 60% de lama vermelha e 40% de argila permite a produção de blocos cerâmicos vazados estruturais que atendem às normas técnicas de absorção de água e resistência, superando inclusive os blocos de referência feitos apenas com argila. A presença de óxidos de ferro e cátions fundentes no resíduo auxilia na densificação e redução da porosidade durante a sinterização (Silva Filho et al., 2007; Macêdo et al., 2011)

No âmbito de infraestrutura, o reaproveitamento na pavimentação asfáltica e de concreto é outra vertente. A lama vermelha pode ser processada para substituir integralmente a areia na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers), alcançando resistências de até 36 MPa, adequadas para tráfego leve (Sotero, R. H. et al., 2007). Como enchimento em misturas asfálticas, o resíduo melhora a estabilidade mecânica, aumenta a resistência à deformação permanente e reduz a profundidade de sulcos nas vias, configurando-se como uma alternativa sustentável à exploração de agregados naturais (Mendes et al., 2023).

Na indústria química, o resíduo ativado por tratamentos térmicos ou químicos funciona como um catalisador eficiente para a produção de biodiesel e processos de hidrogenação. Além disso, suas propriedades adsortivas permitem seu uso como agente remediador em solos contaminados e no tratamento de efluentes industriais para a remoção de metais pesados, corantes e fosfatos

No entanto, a maioria dos usos anteriormente abordados para a lama vermelha são sugeridos a partir de estudos de laboratório, e pouca coisa disso é uma realidade industrial principalmente no Brasil. Em suma, é preciso que esse panorama de reaproveitamento e economia circular seja aliado à uma gestão estratégica e rigorosos critérios ESG (Environmental, Social and Governance) a fim de que se concretizem e sejam cada vez mais facilmente aplicados.

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Caracterização da pesquisa

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, de abordagem qualitativa e objetivos exploratórios e descritivos. No que diz respeito aos procedimentos técnicos, trata-se de uma revisão bibliográfica, desenvolvida por meio da análise de artigos científicos, pesquisas, livros, normas técnicas, legislações e documentos institucionais relacionados à gestão de resíduo provenientes do beneficiamento da bauxita.

Esta pesquisa tem como finalidade reunir, analisar e discutir o conhecimento disponível na literatura sobre as principais tecnologias empregadas na disposição e no reaproveitamento da lama vermelha, considerando aspectos ambientais, sociais, operacionais e legais.

4.2 Estratégia de busca bibliográfica

Como estratégia de busca e levantamento bibliográfico para obtenção do conteúdo abordado, foram adotados alguns critérios, tais como, as bases de dados para busca, período das publicações a serem analisadas, palavras-chaves específicas, e critérios de inclusão e exclusão para escolha dos artigos e pesquisas.

Em relação às bases de dados, foram utilizadas as seguintes:

- Google Acadêmico
- Scielo
- ScienceDirect
- CAPES
- SpringerLink
- Normas da ABNT
- Publicações e sites da ANM, CONAMA, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA), Ministério das Minas e energia, ABAL, International Aluminium Institute (IAI), CETEM, CBA, Hydro e Alcoa.

No que diz respeito ao período das publicações analisadas, foram priorizados estudos de 2005 a 2025; considerando-se dados e informações mais atualizadas

possíveis sem perder o histórico. Este tema apresenta grande relevância e evolução ao longo do tempo, à medida que legislações são atualizadas, novas tecnologias são apresentadas e princípios sociais e ambientais evoluem concomitantemente.

A fim de facilitar e direcionar a busca de acordo com o tema que é abordado no trabalho, foram selecionadas a seguintes palavras - chaves pesquisadas tanto em português quanto em inglês:

- "Lama vermelha"
- "Resíduo de bauxita"
- "Disposição a seco"
- "Empilhamento a seco"
- "Resíduo filtrados"
- “Filtros prensas”
- "Barragem de resíduo"
- “*Dewatering*” (Desaguamento)
- “Indústria de alumínio”
- “Processo Bayer”
- “Beneficiamento da bauxita”
- “*Tailings Dry Backfill*” (Retorno de Rejeitos Secos à Cava)

Por fim, como a utilização dos critérios anteriores corroborou para um forte acervo de conteúdo encontrado, adotou-se alguns critérios de inclusão e exclusão das pesquisas, a fim de serem selecionadas as melhores e mais relevantes.

Sendo assim, os critérios de inclusão foram estudos que envolvessem:

- a caracterização da lama vermelha;
- processos com a bauxita;
- barragens de resíduo;
- empilhamento a seco;
- filtragem de resíduo
- reaproveitamento da lama vermelha;
- economia circular;
- legislação ambiental brasileira.
- processo de beneficiamento da bauxita
- impactos socioambientais
- contexto da indústria do alumínio no mundo

- estudo de caso das maiores refinarias de alumina do Brasil

Já os critérios de exclusão:

- trabalhos sem relação direta com o tema;
- estudos duplicados;
- publicações sem acesso ao texto completo.

4.3 Seleção e análise dos estudos

Uma etapa fundamental para o desenvolvimento do projeto de pesquisa foi a seleção e análise desses estudos. O início do projeto se deu com a busca do conteúdo até atingir uma quantidade de pelo menos 20 artigos que abordassem todos os temas, conceitos e teorias inicialmente programadas. Paralelamente à busca, realizou-se a triagem desses estudos para serem de fato selecionados ou não. Então, foram escolhidos os estudos que atendiam à todos os critérios do item 4.2.

Ao final da seleção, e leitura de todos os estudos, realizou-se o processo de organização destes em categorias. Deste modo, foram separados por tema e posteriormente por tópico do trabalho que seria abordado. Abaixo apresenta-se a relação de estudos e quantidades finais selecionadas, totalizando 51 referências:

- 12 TCCs, dissertações, monografias e outros estudos acadêmicos
- 10 Artigos científicos/revisões
- 9 Leis, normas e documentos oficiais
- 7 Instituições/relatórios/documentos técnicos
- 10 Sites e notícias/fontes institucionais
- 3 canais de eventos

4.4 Critérios de comparação das tecnologias

A metodologia principal deste estudo, que liga o objetivo (Capítulo 2) aos resultados e discussões (Capítulo 5), e que viabiliza validar se os objetivos do trabalho foram alcançados e quais foram as conclusões obtidas, foi a comparação entre tecnologias de disposição do resíduo de bauxita e a discussão sobre as alternativas para alteração do seu ciclo de vida.

Convencionalmente, tem-se que a bauxita é a matéria-prima que após o término de sua utilidade se tornará um resíduo em uma barragem. Todavia, as novas tecnologias trazem que a lama vermelha pode ser a matéria-prima de novos produtos além de minimizarem uma série de impactos negativos.

Para realização dessa análise comparativa, foram adotados os seguintes critérios de comparação: aspectos ambientais, operacionais e econômicos envolvidos, conformidade legal presente e potencial de reaproveitamento do resíduo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Tecnologias alternativas à disposição em barragens

Na atualidade, são conhecidos por serem alternativas à disposição à úmido, os métodos secos ou semi secos; e que já vêm sendo amplamente utilizados. Essa transição é impulsionada pela necessidade de reduzir riscos operacionais e ambientais, além da crescente escassez de áreas para a construção de grandes barramentos. E, para que isso seja possível, essas inovações buscam aumentar o teor de sólidos no resíduo descartado, minimizando o volume de efluentes e a necessidade de grandes e complexas estruturas de contenção (Silva, 2020; Nery, 2013).

Os métodos semi-secos e de alta densidade são tecnologias que buscam obter misturas densas ou pastas minerais através do espessamento prévio do resíduo. De acordo com a descrição de Lima (2006), no método de Disposição de Lama Espessada (TTD, na sigla em inglês), o resíduo é descarregado com cerca de 40% de sólidos a partir de pontos elevados, criando superfícies que favorecem a evaporação; o que apresenta um aumento de 33% no teor de sólido se considerada a média de umidade da lama vermelha de 70% (Nery, 2013). Já a Disposição em Pasta (paste disposal) consiste no processamento do resíduo em uma mistura densa e viscosa que não sofre segregação durante o transporte, sendo frequentemente utilizada para o preenchimento de minas subterrâneas (Biesinger & Slottee, 2011).

Como exemplo, tem-se a empresa global Hydro, a qual utiliza de um método denominado de “Tailings Dry Backfill” (TDB, na sigla em inglês); o qual é similar ao denominado TTD no parágrafo anterior. Nesta técnica os resíduo passam por um processo de secagem, podendo durar de 30 a 60 dias, a depender da estação do ano, sendo necessário na estação mais chuvosa um período maior para encerramento desse ciclo de secagem. Com este método o resíduo atinge um mínimo de 60% de teor sólido e por fim é escavado e depositado de volta nos locais minerados. E isto pode ocorrer também em uma área com instalações específicas para armazenar resíduos de mineração. No caso da Hydro Brasil estão localizadas em Paragominas (PA) (Hydro, 2026)

Figura 10 - Lama vermelha exposta à secagem natural para posterior disposição final



Fonte: Hydro, 2026

Já o empilhamento a seco, ou "dry stacking", é uma das principais alternativas atualmente que contribui para a diminuição de riscos acometidos pelas barragens de resíduo, além de ser referência mundial. Nesse processo, a fim de dobrar o teor de sólidos inicial no resíduo, obtém-se uma faixa entre 45% e 60% utilizando-se filtros, comumente rotativos ou de tambor, ou técnicas de espessamento de lama. Em seguida, após atingir o teor de sólido pretendido o resíduo é disposto de forma difusa em camadas finas, alternando as frentes de aterramento para permitir ciclos de secagem por evaporação natural e drenagem mais rápidos (Tabereaux, 2019; Ávila, 2012).

De acordo com Silva et al. (2007) e Nery (2013), a lama vermelha vai sendo descarregada em pilhas até alcançar determinada altura. Esse empilhamento ocorre em diferentes leitos de secagem na qual a área de disposição é previamente subdividida, para que seja justamente realizada essa alternância entre os leitos até que todos sejam completos e o ciclo se reinicie. Esta técnica traz alguns benefícios como a melhora da estabilidade estrutural do depósito e permite a recuperação de soda cáustica e água para o processo industrial. Certamente, uma das etapas mais importantes para a garantia da estabilidade do aterro é a compactação; sendo assim, a cada pilha construída, posteriores camadas do resíduo compacto se estabilizam.

Outra tecnologia amplamente utilizada é a filtragem e disposição a seco, também conhecida por “Dry Cake Disposal”. Essa técnica, envolve o uso de tecnologias avançadas de desaguamento para gerar uma "torta" de resíduo com teor

de sólidos superior a 70%. O resíduo filtrado encontra-se em estado não saturado em água, o que permite o transporte por correias ou caminhões e a posterior compactação mecânica (Power et al., 2011; Kinnarien et al., 2015)

Nesse contexto, destacam-se os filtros-prensas, os quais são capazes de produzir essas tortas compactas com teor de sólidos entre 75% e 85%, permitindo a recuperação de mais de 80% da soda cáustica presente no filtrado. Isto ocorre devido à aplicação de uma pressão positiva (em torno de 10 atm) sobre a polpa contra o meio filtrante, superando a eficiência de filtros a vácuo. Mediante isso, faz-se a disposição final em pilhas de aterro compactado, maximizando a capacidade de estocagem e reduzindo drasticamente o potencial de risco geotécnico (Silva, 2020; e Nery, 2013).

Como alternativa contínua, os filtros hiperbáricos de disco (HBF) operam integrados a um vaso hermético sob pressão pneumática de até 6 bar, superando a elevada pressão capilar intrínseca aos microporos da lama vermelha. Esse diferencial de pressão otimiza a separação sólido-líquido, reduzindo a umidade residual do resíduo para patamares entre 20% e 25%. Embora os filtros prensa convencionais alcancem os menores níveis absolutos de umidade residual na torta, o sistema hiperbárico consolida-se como uma solução altamente eficiente para refinarias devido à sua operação ininterrupta e automatizada, menor demanda por tecidos filtrantes por tonelada processada e expressiva redução da área física instalada (footprint) na planta de deságue (Santana, M. et al, 2007; Aandritz Group., 2026)

A empresa Hydro realiza uma combinação entre a filtragem pelo método extremamente eficiente dos filtros-prensas e o posterior empilhamento a seco pelo processo de disposição e compactação. São 9 filtros-prensas utilizados, os quais geram um resíduo seco com 78% de teor de sólidos, o que possibilita a necessidade de uma área quatro vezes menor para o armazenamento do resíduo quando comparado aos filtros de tambor. O mesmo é realizado pela Alcoa, que, a partir dos filtros-prensas gera um resíduo com 30% de umidade e o direciona para uma nova área de disposição onde será compactado. As duas empresas vêm realizando o descomissionamento, ou seja, fechamento seguro das barragens úmidas, a partir da troca dos métodos de disposição úmidos pelos secos (Hydro, 2026; Alcoa, 2021).

A CBA, também entra nesse grupo pois possui três filtros-prensa (Figuras 11 e 12) que aumentam o teor de sólidos do resíduo, que antes era disposto

diretamente na barragem com cerca de 25% de sólidos, para 75%, e assim são gradualmente empilhados e transportados para a barragem enquanto a água retorna para o processo. Desse modo, a vida útil da barragem foi prolongada e caminha rumo ao descomissionamento da área assim como as outras empresas (Alumínio, 2024).

Figura 11 – Vista de um dos Filtros-Prensa da CBA



Fonte: Revista Alumínio, 2024

Figura 12 - Vista externa do galpão onde estão localizados os filtros-prensa da CBA



Fonte: Revista Alumínio, 2024

Apesar das vantagens, existem alguns desafios geotécnicos e operacionais advindos do processo. A disposição a seco exige um rigoroso controle de compactação e umidade para garantir a estabilidade das pilhas e evitar a geração de poeira. Conhecer as poropressões construtivas (pressão que a água exerce nos espaços vazios (poros) entre os grãos de um solo ou de uma rocha), que se desenvolvem no maciço da pilha durante sua elevação é um fator crítico (Silva, A., 2020).

Alguns estudos de simulação numérica trazem que, para dissipar esses excessos de pressão e manter o fator de segurança dentro dos limites aceitáveis, a umidade de compactação e a presença de sistemas de drenagem interna são fundamentais. Ademais, em períodos chuvosos, a trafegabilidade de equipamentos demanda estratégias de zoneamento operacional para garantir a continuidade da disposição e a segurança dos operadores (Silva, A., 2020).

5.2 Análise crítica das tecnologias de disposição de resíduo de bauxita sob a perspectiva da gestão sustentável

5.2.1 Comparação entre os métodos construtivos de barragens de resíduo

O primeiro passo das comparações das tecnologias se deu por parte dos métodos construtivos de barragens de resíduo: montante, jusante e linha de centro. A partir dos resultados obtidos de cada método, realizou-se uma tabela comparativa (Tabela 6) seguida da análise crítica para maior clareza. Suas características construtivas resultam em diferenças significativas quanto aos aspectos de segurança, custos de implantação, requisitos operacionais e impactos ambientais, embora todos tenham sido amplamente utilizados pela indústria mineral ao longo das últimas décadas.

Tabela 6 - Resumo comparativo entre os principais métodos construtivos

Critério	Montante	Jusante	Linha de centro
Nível de segurança	Baixo	Alto	Médio/Alto

Custo de implantação	Baixo	Alto	Médio
Demanda de área	Baixa	Alta	Média
Armazenamento de água	Baixo	Alto	Médio
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Alta	Média
Atendimento às exigências legais atuais	Não	Sim	Sim
Alteamentos	Ideal menos de 10m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Compatibilidade com uma gestão sustentável dos resíduos	Baixa	Média	Média

Fonte: Adaptado de Cardozo, Pimenta e Zingano (2016); Soares et al. (2010); UFPA (2016)

Foi observado que o método a montante apresenta como principal vantagem o menor custo de implantação e a menor demanda por materiais de construção, uma vez que os alteamentos são executados sobre o próprio resíduo previamente depositado. Essas características contribuíram para sua ampla utilização durante muitos anos, principalmente em empreendimentos que buscavam reduzir custos operacionais. Entretanto, a estabilidade da estrutura depende diretamente do comportamento geotécnico do resíduo, tornando esse método mais suscetível à liquefação e a rupturas em situações de elevada saturação ou eventos sísmicos. Após os rompimentos das barragens de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), esse método passou a ser proibido no Brasil para novas barragens e alteamentos, conforme estabelecido pela Lei nº 14.066/2020 e pelas normas da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022).

Em contrapartida, o método a jusante é reconhecido como a alternativa convencional de maior segurança. Nesse sistema, cada alteamento é executado

sobre solo natural ou sobre o próprio maciço compactado da barragem, proporcionando maior estabilidade estrutural e menor influência das características do resíduo na resistência da obra. Como consequência, apresenta menor risco de liquefação e melhor desempenho em condições adversas. Entretanto, essa configuração exige maiores volumes de material para construção, maior área de implantação e investimentos mais elevados, fatores que podem limitar sua aplicação em determinados empreendimentos.

O método de linha de centro representa uma solução intermediária entre os dois sistemas anteriores. Nesse modelo, o eixo da barragem permanece praticamente constante durante os alteamentos, permitindo redução do consumo de material em comparação ao método a jusante, sem comprometer significativamente a estabilidade da estrutura. Apesar de apresentar desempenho satisfatório sob o ponto de vista geotécnico, seu funcionamento depende de sistemas de drenagem interna eficientes para evitar o aumento da pressão de poros e garantir a estabilidade do maciço ao longo de sua vida útil.

Sob a perspectiva ambiental, verifica-se que os três métodos convencionais compartilham uma limitação importante: todos são baseados na disposição hidráulica dos resíduo, resultando no armazenamento de grandes volumes de material com elevado teor de umidade; em média 70% a 80% (Alves, S., 2011).

No caso da mineração de bauxita, esse aspecto torna-se particularmente relevante devido às características da lama vermelha, que apresenta elevada alcalinidade em decorrência da presença residual de hidróxido de sódio utilizado no processo Bayer. Dessa forma, eventuais falhas estruturais ou vazamentos podem provocar a contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, além de causar impactos significativos sobre a fauna, a flora e as comunidades localizadas a jusante das barragens.

Além dos riscos associados à segurança, as barragens convencionais demandam grandes áreas para implantação e permanecem como estruturas que exigem monitoramento contínuo mesmo após o encerramento das atividades minerárias. Essa condição aumenta os custos de operação, manutenção e descomissionamento, além de tornar mais complexos os processos de recuperação ambiental das áreas ocupadas.

5.2.2 Avaliação comparativa das tecnologias alternativas de disposição

A comparação entre a disposição convencional em barragens e as tecnologias alternativas de desaguamento trazidas no item **5.1** evidencia diferenças significativas quanto ao desempenho socioambiental, à segurança operacional, à recuperação de recursos e à gestão do passivo ambiental. Enquanto as barragens convencionais foram concebidas prioritariamente para o armazenamento seguro de grandes volumes de resíduo saturados, os métodos de filtragem e empilhamento a seco incorporam objetivos adicionais relacionados à redução dos impactos ambientais, ao aumento da eficiência no uso de recursos naturais e à diminuição dos riscos associados à disposição da lama vermelha (Silva et al., 2007; Power et al., 2011).

Tabela 7 - Resumo comparativo entre os principais métodos de disposição

Critério	**Barragem convencional**	**Filtragem**	**Empilhamento a seco**
Consumo de água	Alto	Médio	Baixo
Recuperação de água/ soda cáustica	Baixa	Alta	Alta
Risco geotécnico	Alto	Baixo	Muito baixo
Necessidade de barragem	Sim	Parcial	Não
Área ocupada	Alta	Média	Baixa
Investimento inicial	Baixo	Alto	Alto
Custo operacional	Baixo	Alto	Médio/Alto

Compatibilidade com economia circular	Baixa	Alta	Alta
Adequação às tendências atuais da mineração	Baixa	Alta	Muito alta

Fonte: Elaborado com base em Davies (2011); Silva Filho, Alves e Da Motta (2007); Nery (2013); Alves (2020).

Sob a perspectiva da gestão sustentável dos resíduo de bauxita, observou-se que as tecnologias de desaguamento apresentam vantagens relevantes em relação à disposição úmida. Um dos principais aspectos refere-se ao consumo de água. Nas barragens convencionais, parte significativa da água permanece retida no resíduo ou é perdida por evaporação e infiltração, exigindo maior demanda de captação hídrica. Em contrapartida, os sistemas de filtragem possibilitam elevadas taxas de recuperação de água e soda cáustica, permitindo seu retorno ao processo Bayer e contribuindo para práticas alinhadas aos princípios da economia circular (Silva, A., 2020; Nery, 2013).

Além da recuperação de recursos, o menor volume de líquido presente na lama vermelha diminui significativamente o potencial de infiltração de soluções alcalinas no solo e nas águas subterrâneas, reduzindo o risco de contaminação ambiental. Da mesma forma, a eliminação da lâmina de água característica das barragens convencionais reduz drasticamente a suscetibilidade à liquefação e o potencial de ocorrência de falhas geotécnicas catastróficas, aspecto que ganhou maior relevância após os desastres de Mariana e Brumadinho. Vale ressaltar a importância do levantamento da sismicidade da área a ser empregada. Isso porque, quando apresentado potencial de risco sísmico, a disposição de resíduo filtrados em pilhas oferece superior estabilidade estrutural quanto ao represamento convencional.

Certamente a biodiversidade do local de implantação de uma extensa estrutura de barramento de resíduo também é amplamente impactada. Isso ocorre pela supressão de vegetação necessária para implantação; fragmentação de habitats; mortalidade de organismos aquáticos em eventos de incidentes de vazamento de lama e alteração de áreas úmidas. Ademais, os grandes reservatórios

de resíduo podem atrair a fauna da região a consumir a lâmina de água contaminada exposta.

Outro fator importante refere-se à ocupação do solo. As barragens convencionais demandam extensas áreas para armazenamento permanente dos resíduo e necessitam de sucessivos alteamentos ao longo da vida útil da operação na refinaria. Isso se soma ao fato de que também potencializa a alcalinização do solo, a perda de fertilidade, a dificuldade de revegetação e a necessidade de neutralização química.

Contudo, as tecnologias de disposição a seco permitem maior densidade de armazenamento, possibilitando a disposição de maiores volumes de sólidos em áreas significativamente menores. Estudos indicam que os métodos secos podem reduzir em até quatro vezes a área necessária para disposição quando comparados ao método úmido, ou seja, uma menor área que futuramente terá de ser recuperada, além de favorecer essa recuperação ambiental progressiva das áreas que vêm sendo utilizadas.

A análise também demonstrou que os benefícios das tecnologias alternativas extrapolam os aspectos estritamente operacionais, refletindo diretamente sobre os impactos sociais e ambientais associados à atividade industrial. A redução do volume de resíduo armazenados em barragens diminui o dano potencial e o risco associado a eventuais acidentes, aumentando a segurança das comunidades localizadas a jusante e reduzindo a necessidade de um intenso monitoramento permanente durante e após o encerramento das operações. Consequentemente, observa-se uma diminuição do passivo ambiental de longo prazo e maior facilidade para o fechamento e revegetação das áreas de disposição em comparação às áreas que foram utilizadas por décadas como barragens.

Nesse contexto, a etapa de desaguamento assume papel central na gestão sustentável da lama vermelha. Conforme discutido anteriormente, os filtros-prensa são capazes de produzir tortas com teores de sólidos entre 70% e 85%, sendo um aumento de no mínimo 130% em relação à condição inicial, permitindo elevada recuperação de água de processo. A filtragem por esses equipamentos é extremamente eficiente na recuperação de soda cáustica, podendo chegar a 98% , o que compensa parte do alto custo de investimento.

Existe um *trade-off* econômico, no qual a eficiência na recuperação de insumos é diretamente proporcional ao consumo de energia da planta de filtragem.

Espessadores de alta performance têm menor custo de capital, mas recuperam menos soda que os filtros-prensa ou hiperbáricos. (Silva, A., 2020; Nery, 2013).

A obtenção de um resíduo com elevado teor de sólidos não apenas reduz os riscos associados à disposição, mas também amplia as possibilidades de armazenamento, transporte e eventual reaproveitamento da lama vermelha em diferentes aplicações industriais, ao contrário da necessidade de disposição definitiva em barragens ou nos próprios aterros secos. Após a filtragem, há uma redução significativa na concentração de álcalis, o que confere potencial ao resíduo como insumo em setores de produção de cimento e cerâmica ou até como solo para projetos de revegetação ou assentamento (Mendes et al., 2023) .

Enquanto na barragem convencional o resíduo fica saturado em água, misturado com impurezas, o que dificulta sua recuperação, principalmente pela escavação e secagem após a retirada da lagoa. Já é sabido o potencial de reaproveitamento do resíduo a partir das tecnologias de filtragem e empilhamento. No entanto, a disposição a seco não deixa de ser o ciclo do berço ao túmulo, e para convertê-lo em economia circular (berço ao berço) é necessário que haja essa parceria com outras indústrias que utilizarão o resíduo de bauxita como matéria-prima.

E quanto ao descomissionamento de barragens, passar a realizar a disposição a seco com o resíduo proveniente da filtragem, por exemplo, pode ser o início. À medida que esse for sendo disposto a fim de elevar o teor de sólido da barragem úmida, a área poderá ser descaracterizada no futuro mais rápida e facilmente com a revegetação e sem enormes quantidades de um passivo ambiental sem destino. A barragem se manteria inalterada, mas como uma área revitalizada, como ocorre em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Aliás, a reabilitação ocorreria apenas após o encerramento das atividades da refinaria, não podendo ser realizada progressivamente como em áreas de empilhamento a seco; e ainda se faz necessário o monitoramento pós-fechamento prolongado.

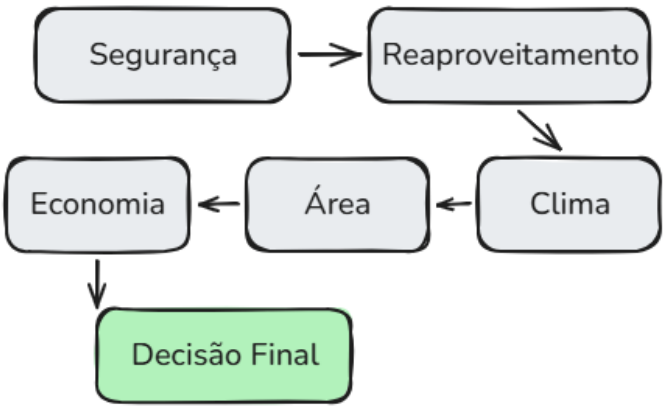
Entretanto, apesar das vantagens ambientais e de segurança, a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta limitações técnicas e econômicas. Os sistemas de filtragem demandam elevados investimentos em equipamentos, maior consumo energético e infraestrutura específica para transporte mecânico do resíduo, resultando em custos de capital (CAPEX) e de operação (OPEX) superiores aos da disposição convencional.

Além disso, fatores climáticos exercem influência significativa sobre o desempenho operacional das pilhas de resíduo filtrados. Em regiões de elevada pluviosidade, a compactação adequada do material e a trafegabilidade dos equipamentos podem ser comprometidas, exigindo estratégias de zoneamento operacional, drenagem eficiente e controle rigoroso da umidade para garantir a estabilidade do depósito. Regiões mais secas e com alta incidência solar favorecem o processo de secagem natural em ciclos (Silva, A., 2020).

A escolha da tecnologia mais adequada também depende de aspectos geográficos, logísticos e mineralógicos. A disponibilidade de área para implantação, a topografia do terreno, a distância entre a refinaria e a área de disposição e as características mineralógicas da bauxita influenciam diretamente a eficiência da filtragem e os custos de transporte do resíduo. Bauxitas com maior teor de argilominerais, por exemplo, podem apresentar menor filtrabilidade, reduzindo a eficiência do processo de desaguamento e impactando a viabilidade econômica da tecnologia (Nery, 2013).

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que não existe uma solução universalmente superior para todas as situações (Tabela 8). A seleção da tecnologia de disposição deve considerar de forma integrada os aspectos legais, técnicos, ambientais, econômicos e operacionais de cada empreendimento. Ainda assim, observa-se uma tendência crescente de substituição gradual das barragens convencionais por métodos de filtragem e empilhamento a seco, impulsionada pelo fortalecimento das exigências regulatórias, pela necessidade de redução dos riscos geotécnicos e pela busca por modelos de mineração mais compatíveis com os princípios da sustentabilidade e da economia circular. A Figura 13 apresenta um fluxo de critérios a serem observados para a escolha da tecnologia a ser adotada.

Figura 13 - Fluxo de critérios para escolha da tecnologia



Fonte: Compilado de IBRAM (2021); ICMM (2020); Alves (2021); Amorim Lopes (2022)

Tabela 8 - Comparação de Impactos socioambientais entre as tecnologias de disposição

Critério socioambiental	Barragem	Filtragem	Empilhamento a seco
Risco de contaminação hídrica	Alto	Médio	Baixo
Dano potencial às comunidades	Alto	Médio	Baixo
Passivo ambiental pós-fechamento	Alto	Médio	Baixo
Facilidade de revegetação	Baixa	Média	Alta
Impactos quanto a biodiversidade	Alto	Média	Média
Potencial de reaproveitamento	Baixo	Alto	Muito alto

Fonte: Compilado de IBRAM (2021); ICMM (2020); Alves (2021); Amorim Lopes (2022)

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as principais tecnologias de disposição dos resíduo de bauxita sob a perspectiva da gestão sustentável, considerando aspectos relacionados à segurança geotécnica, aos impactos socioambientais, à viabilidade operacional, ao potencial de reaproveitamento da lama vermelha e às exigências legais aplicáveis ao setor mineral e industrial.

A análise realizada demonstrou que, embora tenham sido amplamente utilizados pela indústria da alumina durante décadas, os métodos convencionais de disposição em barragens apresentam limitações significativas sob a ótica da sustentabilidade. Além da necessidade de grandes áreas para implantação, essas estruturas armazenam elevados volumes de resíduo com alto teor de umidade, aumentando o risco de infiltração de soluções alcalinas, de contaminação do solo e dos recursos hídricos e de ocorrência de acidentes com potencial de causar impactos ambientais, sociais e econômicos de grande magnitude. Somam-se a esses aspectos a necessidade de monitoramento permanente, mesmo após o encerramento das operações, e a complexidade dos processos de descomissionamento e recuperação ambiental.

Em contrapartida, validou-se que as tecnologias alternativas de desaguamento, especialmente a filtragem por filtros-prensa associada ao empilhamento a seco, representam avanços significativos na gestão dos resíduo de bauxita. Essas técnicas reduzem expressivamente a dependência de barragens convencionais, diminuem o volume de água presente no resíduo, reduzem o risco de liquefação e de falhas geotécnicas, demandam menor área para disposição e favorecem a recuperação progressiva das áreas utilizadas. Ainda, possibilitam elevadas taxas de recuperação de água e soda cáustica para reutilização no processo Bayer, contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos naturais e para a redução do passivo ambiental.

Outro aspecto relevante identificado neste estudo refere-se ao potencial de valorização da lama vermelha. Dessa forma, as tecnologias de desaguamento não apenas reduzem os impactos associados à disposição final dos resíduo, mas também ampliam as possibilidades de inserção da lama vermelha em estratégias de economia circular, permitindo que esse material deixe de ser tratado exclusivamente

como um passivo ambiental e passe a ser reconhecido como um recurso com potencial de aproveitamento.

Entretanto, também foi possível verificar que a adoção dessas tecnologias ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e operacionais. Os elevados investimentos necessários para implantação dos sistemas de filtragem, o maior consumo energético, a necessidade de infraestrutura específica para transporte do resíduo e a influência de fatores climáticos, geográficos e mineralógicos podem limitar sua aplicação em determinados empreendimentos. Dessa forma, a escolha da tecnologia de disposição deve resultar de uma avaliação integrada das condições específicas de cada refinaria, conciliando segurança operacional, desempenho ambiental, viabilidade econômica e exigências regulatórias.

Conclui-se, portanto, que não há uma tecnologia capaz de eliminar completamente os impactos socioambientais associados à disposição dos resíduo de bauxita. No entanto, as tecnologias de desaguamento, em especial a combinação entre filtragem e empilhamento a seco, apresentam desempenho superior quando avaliadas sob a perspectiva da gestão sustentável, por reduzirem significativamente os riscos socioambientais, diminuírem a dependência de barragens convencionais, favorecerem a recuperação de recursos e ampliarem o potencial de reaproveitamento da lama vermelha. Assim, observa-se uma mudança de paradigma na gestão desses resíduo, em que a disposição deixa de representar apenas a etapa final do processo produtivo e passa a integrar estratégias voltadas à redução do passivo ambiental, ao fortalecimento da economia circular e ao uso mais eficiente dos recursos naturais.

7. REFERÊNCIAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. [S. l.: s. n.], [s. d.]. Disponível em: https://abal.org.br/. Acesso em: 30 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos referentes à segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022.

ALCOA. Alcoa investe R$ 310 milhões na disposição de resíduo a seco e gera empregos. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.alcoa.com/brasil/pt/news/releases?id=2021/06/alcoa-investe-r-310-milhoes-na-disposicao-de-residuo-a-seco-e-gera-empregos&year=z2021. Acesso em: 28 jul. 2026.

ALUMÍNIO, R. R. CBA investe R$ 500 milhões em sistema de tratamento de resíduos com disposição a seco. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.revistaaluminio.com.br/cba-investe-r-500-milhoes-em-sistema-de-tratamento-de-residuos-com-disposicao-a-seco. Acesso em: 28 jul. 2026.

ALVES, Ivo Chaves Souza. Uso e aproveitamento dos resíduos de bauxita no Brasil. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/5172/1/IVOCHAVESSOUZAALVES.pdf. Acesso em: 13 jul. 2026.

ALVES, P. I. A. Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

AMORIM LOPES, Ana Beatriz Quadros. Processo produtivo do alumínio primário: principais impactos ambientais associados e medidas de mitigação adotadas pelas empresas que atuam no Brasil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em:

https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/71823/3/2022_tcc_abqalopes.pdf. Acesso em: 30 jul. 2026.

ANDRITZ GROUP. Red mud filtration in alumina production: optimizing washing, de-liquoring, and bauxite residue management in the Bayer process. Andritz Separation Insights, 2026. Disponível em: https://www.andritz.com/separation-en/insights/red-mud. Acesso em: 26 ago. 2026.

APARECIDA, V. S. Interfaces ambientais em refinarias de alumina brasileiras: a influência da localização geográfica na sustentabilidade e inovação industrial. 2017. Universidade Federal de Campina Grande. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/44746.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BRAGA, F. Y. A. Utilização de tecnologias de filtragem de resíduo para empilhamento a seco. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

BRANCO, Castelo; SILVA, Gabriela. Caracterização física, química, mineralógica e geotécnica de rejeito ultrafino de minério de ferro visando aplicações em empilhamento a seco. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 1 out. 2020.

CAMILO, R.; SACCHI HOMRICH, A. Estratégias e desafios para a implantação da economia circular: um estudo de caso em empresa fabricante de alumínio. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://submissao.singep.org.br/11singep/arquivos/151.pdf. Acesso em: 12 jul. 2026.

COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (CBA). **Relatório anual 2025**. [S. l.]: CBA, 2026. Disponível em: https://www.cba.com.br/relatorio-de-sustentabilidade/. Acesso em: 14 set. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre o licenciamento ambiental. Brasília, DF: CONAMA, 1997.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração: uma revisão. Holos, v. 3, p. e5367, 2016

DE CARVALHO, Adonay Saráty et al. Gestão de resíduos na construção civil: o potencial da lama vermelha como estratégia sustentável. ARACÊ, v. 7, n. 7, p. 39818-39834, 2025.

DAVIES, Michael. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. In: Proceedings of Tailings and Mine Waste. Vancouver, BC, Canadá, p. 1-9, 2011.

DOS SANTOS, Roseane Martins et al. Incorporação de lama vermelha na indústria cerâmica: uma revisão. Research, Society and Development, v. 10, n. 10, p. e321101018949-e321101018949, 2021.

GUILHERME DA, J. et al. A indústria do alumínio: estrutura e tendências. [S. l.]: BNDES, [s. d.]. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2499/3/A%20BS%2033%20A%20ind%c3%bastria%20do%20alum%c3%adnio_estrutura%20e%20tend%c3%aancias_P.pdf.

HYDRO. Depósitos de resíduos sólidos. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.hydro.com/br/br/depositos-de-residuos-solidos/. Acesso em: 28 jul. 2026.

HYDRO. Gestão de rejeitos. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.hydro.com/br/global/sustentabilidade/nossa-abordagem/natureza/gestao-de-residuos/. Acesso em: 28 jul. 2026.

IBAMA. Laudo técnico preliminar: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Brasília, DF: IBAMA, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Gestão de rejeitos na mineração brasileira. Brasília, DF: IBRAM, 2021.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM); UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT (PRI). Global Industry Standard on Tailings Management. London: ICMM; UNEP; PRI, 2020.

MENDES, Lara Pereira Tavares et al. Utilização de resíduo de bauxita como alternativa sustentável na pavimentação: uma revisão de literatura. 2023.

MINERAÇÃO DE FUTUROS: TERRAS RARAS, TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O NOVO PACTO SOCIAL. Mineração de futuros: terras raras, transição energética e o novo pacto social. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://revistageo.com.br/revgeo/article/view/1078/788.

MINERALIS. Mineralis. Rio de Janeiro: CETEM, 2026. Disponível em: https://mineralis.cetem.gov.br.

NERY, Kellen Dias. Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa. 2013.

PORTAL OFICIAL DO GOVERNO DE MINAS GERAIS. Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão. Belo Horizonte: Governo de Minas Gerais, 2021. Disponível em: https://www.mg.gov.br/probrumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-córrego-do-feijão. Acesso em: 30 jul. 2026.

ROCHA, L. C. As tragédias de Mariana e Brumadinho: é prejuízo? Para quem? Caderno de Geografia, v. 31, número especial 1, 2021.

SANTANA, A. C.; SOUZA, J. R. R.; BRITO, R. F.; OLIVEIRA, B. F. B. Beneficiamento do silicato de alumínio para utilização como carga mineral em processo de produção de tintas, plásticos e borrachas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 29., 2022, Armação dos Búzios. Anais [...]. Campinas, 2022.

SANT'ANA, M. et al. Hyperbaric bauxite filtration: new ways in bauxite transportation. Barcarena: Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A.; Andritz AG, 2007.

SHINOMIYA, Léo Daiki; ALVES, Joner Oliveira; DE OLIVEIRA GOMES, Jefferson. Planejamento de cenários para análises de aplicação da lama vermelha. [S. l.], [s. d.].

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007

SILVA, L. C. Disposição de rejeitos granulares via dry stacking: uma alternativa à disposição em barragens. 2021. Monografia (Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2021.

SILVA, Paulo Henrique Alfenas. Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa. 2020.

SOARES, L. et al. Barragem de rejeitos. In: TRATAMENTO DE MINÉRIOS. 5. ed. [S. l.]: CETEM, 2010. cap. 19, p. 831-896. Disponível em: https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf.

SOUZA, T. S. A. Evolução histórica da legislação brasileira e do Estado de Minas Gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

TESSAROTTO, C. Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking). Anais do XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas, v. 3, p. 430-437, 2015.

TOP 10 bauxite-producing countries in the world. Harbor Aluminum, 24 fev. 2025. Disponível em: https://harboraluminum.com/bauxite-production-by-country/. Acesso em: 30 jul. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Barragens de rejeito de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento. Belém, PA: Universidade Federal do Pará, 2016. Disponível em: https://bdm.ufpa.br/server/api/core/bitstreams/367256dd-1f2a-4cd0-b859-af31f9cb9fed/content. Acesso em: 30 jul. 2026.

VISTA DO BARRAGEM DE REJEITOS. Barragem de rejeitos. 2026. Disponível em: https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/11650/5245.

WILLIAMS, R.; ZINK, D.; O'BRIEN, S. Rejeitos filtrados agregam valor em indústrias competitivas de custo. In: WU, A.; JEWELL, R. (ed.). Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. p. 363-370.