



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGEM E  
GESTÃO AMBIENTAL

RONALDO GUIMARÃES PANTOJA

**VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE FILTRAGEM DE  
RESÍDUO BAUXITA POR TAMBOR E PRENSA COMO ALTERNATIVA PARA  
BARRAGENS**

Tucuruí – PA  
2023

RONALDO GUIMARÃES PANTOJA

**VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE FILTRAGEM DE  
RESÍDUO BAUXITA POR TAMBOR E PRENSA COMO ALTERNATIVA PARA  
BARRAGENS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da  
Universidade Federal do Pará para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr. Adriano Frutuoso da Silva

**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)**

---

GUIMARÃES PANTOJA, RONALDO.  
VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE  
FILTRAGEM DE RESÍDUO BAUXITA POR TAMBOR E  
PRENSA COMO ALTERNATIVA PARA BARRAGENS /  
RONALDO GUIMARÃES PANTOJA. — 2023.  
82 f.

Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo  
de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Mestrado  
Profissional em Computação Aplicada, Tucuruí, 2023.

1. Rejeito filtrado; . 2. Filtro prensa; . 3. Filtro tambor; . 4.  
aterros; . 5. FMEA.. I. Título.

CDD 624

---

RONALDO GUIMARÃES PANTOJA

**VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE FILTRAGEM DE  
RESÍDUO BAUXITA POR TAMBOR E PRENSA COMO ALTERNATIVA PARA  
BARRAGENS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da  
Universidade Federal do Pará para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

Tucuruí, 26 de fevereiro de 2023.

Aprovado por:



---

Prof. Dr. Adriano da Silva Frutuoso  
(Orientador - UFRR; PEBGA/NDAE/UFPA)



---

Prof<sup>a</sup> Dra. Débora Dias Costa Moreira  
(Examinador interno - PEBGA/NDAE/UFPA)



---

Prof. Dr. Tiago de Jesus Souza  
(Examinador Externo - UFSCar)

Para minha esposa Laura e filhas: Clarissa e Cecilia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sua força e luz constante já que sem Ele nada teria sido possível;

Agradeço aos meus pais José da Silva Pantoja e Neuza Guimarães Pantoja pelo apoio e dedicação incondicional que me deram forças seguir firme até aqui e ajudou-me na construção do homem e profissional que hoje sou;

Agradeço à minha esposa Msc. Laura Paraense e as nossas filhas Clarissa e Cecília pela compreensão e por terem me apoiado nos momentos em que mais precisei e por serem os maiores motivos dessa realização;

Agradeço aos amigos de curso e em especial a Engenheira Msc. Fabíola Esquerdo Souza pela atenção, colaboração e amizade desprendida e pelo apoio nos momentos difíceis já que chegar até aqui representou um esforço coletivo;

Agradeço a todos os professores, educadores e mestres que já tive em minha jornada acadêmica, sobretudo, os que aproximaram os conteúdos teóricos à minha atuação profissional;

Agradeço a todos que fazem da UFPA este centro de excelência em Educação que pôde nos fornecer as ferramentas necessárias para o bom desempenho da função e por nos fazer acreditar que daqui para frente tudo vai ser diferente;

Ao Professor e Orientador Dr. Adriano Frutuoso da Silva, que me incentivou dia após dia na construção deste trabalho e foi para mim um verdadeiro amigo por suas instruções e incentivo;

A Hydro Alunorte nas pessoas de Paschoal Cataldi e Daniel Arvani, pelo incentivo, compreensão e de me oportunizarem ao crescimento tanto profissional quanto intelectual e pela colaboração e compreensão nas horas que mais precisei para continuar com esse sonho;

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma tenham influenciado a construção deste Trabalho em especial ao Eng<sup>o</sup>. Hugo Henriques Fernandes e Eng<sup>o</sup> Adriano Ciuffi.

“A terra, ferida, vingá-se produzindo flores” (Tagore)

## RESUMO

As barragens de rejeitos de maneira geral funcionam como um reservatório de rejeitos e água, devido aos métodos de disposição existentes, isso ocorre devido as características dos processos de beneficiamento das mineradoras e refinarias, que utilizam uma concentração de água bastante elevada nesse processo, resultando em rejeitos com teores de sólidos baixos e que oferecem riscos na disposição e que também impactam diretamente no meio em que estão inseridas. Tendo em vista a ocorrência de acidentes envolvendo barragens de rejeitos no Brasil e no mundo e a necessidade de diminuição dos impactos causados, as mineradoras e indústrias de beneficiamento de minério têm investido em tecnologia inovadoras que promovem o desaguamento dos resíduos, tornando-os mais secos e proporcionando uma forma de disposição mais segura. Contudo, nessa direção, esse estudo apresenta os métodos de disposição de rejeitos por via úmida e seco em forma de aterros, obtidos a partir de sistemas de filtração, destacando as vantagens e desvantagens do uso do filtro prensa em comparação ao filtro tambor para a disposição do resíduo de bauxita. Para tanto, foi utilizado aterros experimentais de resíduos de bauxita de uma refinaria de alumina, situada no estado do Pará, que possibilitaram o conhecimento do comportamento do material após filtração por filtro prensa, quando submetido à compactação por trator de esteira e por rolo compactador. Uma análise qualitativa de risco do tipo FMEA também foi analisada para identificar os riscos envolvidos no método de disposição do resíduo filtrado por filtro tambor. O resíduo desaguado por meio do filtro-tambor atinge um teor de sólidos médio de 60% ao final do processo e por filtro prensa até 80%. Os testes de compactação possibilitaram o conhecimento da densidade seca, da umidade ótima e grau de compactação do material desaguado por filtro prensa, quando disposto em forma de aterro controlado. Os dois sistemas de filtração do resíduo (Filtro tambor e Filtro prensa), foram comparados considerando os aspectos, operacionais, de segurança e meio ambiente, permitindo conhecer as vantagens e desvantagens de cada sistema e o método de disposição mais seguro, menos impactante no meio ambiente e menos susceptível a problemas estruturais. A análise FMEA identificou os principais gatilhos e modos de falha relativos aos riscos geotécnicos na operação do sistema de resíduos com filtro tambor, para disposição via construção de plataformas. Os aspectos de "instabilização" e de "galgamento de diques", foram analisados e geraram as matrizes de riscos e suas consequências / efeitos. Os resultados "Riscos Altos" auxiliaram para definir a mudança no sistema de filtragem e método de disposição.

**Palavras-chave:** Rejeito filtrado; Filtro prensa; Filtro tambor; aterros; compactação; teor de sólidos; FMEA.

## ABSTRACT

Tailings dams generally function as a reservoir of tailings and water, due to existing disposal methods, this is due to the characteristics of the processing processes of mining companies and refineries, which use a very high concentration of water in this process, resulting in tailings with low solids contents and that offer risks in the disposal and that also directly impact the environment in which they are inserted. In view of the occurrence of accidents involving tailings dams in Brazil and worldwide and the need to reduce the impacts caused, mining companies and ore processing industries have invested in innovative technology that promote waste dewatering, making them drier and providing a safer form of disposal. However, in this direction, this study presents the methods of disposal of wet and dry tailings in the form of landfills, obtained from filtration systems, highlighting the advantages and disadvantages of the use of the filter press compared to the drum filter for the disposal of bauxite residue. Experimental landfills of bauxite residues from an alumina refinery, located in the state of Pará, were used, which allowed the knowledge of the material behavior after filtering by filter press, when submitted to compaction by track tractor and compactor roller. A qualitative risk analysis of the FMEA type was also analyzed to identify the risks involved in the method of disposal of the filtered residue by drum filter. The residue dewatered through the drum filter reaches an average solids content of 60% at the end of the process and per filter press up to 80%. The compaction tests allowed the knowledge of dry density, optimum humidity and degree of compaction of the material dewatered by filter press, when arranged in the form of a controlled landfill. The two waste filtration systems (Drum Filter and Press Filter) were compared considering the operational, safety and environmental aspects, allowing to know the advantages and disadvantages of each system and the safer disposal method, less impacting on the environment and less susceptible to structural problems. The FMEA analysis identified the main triggers and failure modes related to geotechnical risks in the operation of the waste system with drum filter, for disposal via construction of platforms. The aspects of "insecurity" and "dam galling" were analyzed and generated the risk matrices and their consequences / effects. The results "High Risks" helped to define the change in the filtering system and arrangement method.

**Keywords:** Filtered tailings; Filter press; Drum Filter; landfills; compaction; solids content; FMEA.

## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Países com principais reservas de bauxita. ....	20
Figura 2 - Localização dos produtores de bauxita no Brasil. ....	21
Figura 3 - Extração de bauxita (MRN S/A).....	22
Figura 4 - Operação de produção de bauxita-(MRN S/A).....	22
Figura 5 - Regiões com potencial ocorrência de bauxita laterítica.....	23
Figura 6 - Fluxograma da fabricação de Alumina pelo processo Bayer. ....	25
Figura 7 - Métodos de alteamento de barragens de rejeito.....	28
Figura 8 - Empilhamento drenado .....	29
Figura 9 - Disposição Subaérea: a) Fase de enchimento: sedimentação e adensamento; b) Fase de espera: adensamento e ressecamento. ....	30
Figura 10 - Disposição de rejeito de minério de ferro em pasta.....	31
Figura 11 - Disposição de rejeito filtrado.....	33
Figura 12 - Evolução do comportamento do teor de sólidos.....	34
Figura 13 - Evolução do comportamento dos materiais desaguados.....	34
Figura 14 - Disposição via úmida em barragem.....	35
Figura 15 - Sistema de disposição de rejeitos TTD (a) visão geral (b) reservatório-Mineração Paragominas-Hydro.....	37
Figura 16 - Empilhamento a seco dry stacking, resíduo com T.S 60% oriundo do filtro tambor (Alunorte). ....	38
Figura 17 - Disposição a seco dry cake disposal, operações de terraplenagem no resíduo de bauxita oriundo do filtro prensa.....	39
Figura 18 - Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento.....	41
Figura 19 - Exemplo de filtro tambor.....	44
Figura 20 - Filtro prensa de placas verticais.....	45
Figura 21 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara .....	46
Figura 22 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma.....	46
Figura 23 - Filtro de pressão vertical convencional.....	47

Figura 24 - Ciclo de um filtro de pressão vertical .....	48
Figura 25 - Fluxo de Pesquisa. ....	50
Figura 26 - Croquis da pista teste executada para coleta de dados.....	51
Figura 27 - Comparação entre os resíduos de disposição úmida e seca. ....	52
Figura 28 - Resíduo de bauxita filtrado por filtro prensa com 78% de teor de sólidos. ....	54
Figura 29 - Processo construtivo da pista experimental com resíduo compactado. ....	55
Figura 30 - Execução de testes na pista experimental e ensaios geotécnicos.....	56
Figura 31 - Plataforma de lançamento de resíduo do filtro tambor: a) Vista da plataforma de lançamento b) Caminhão basculhando resíduo com T.S ~60%; c) Detalhe de avanço da plataforma.....	57
Figura 32 - Plataforma de lançamento de resíduo do filtro tambor em declive. ....	57
Figura 33 - Acesso operacional oeste para a plataforma .....	58
Figura 34 - Construção do acesso frontal em declive.....	58
Figura 35 - Matriz de risco FMEA proposta por Robertson & Shaw (2003).....	60
Figura 36 - Alternativa com filtro tambor. ....	64
Figura 37 - Alternativa com filtro prensa .....	65
Figura 38 - Comparativo de Vida Útil dos Sistemas D1/D2/D3 .....	66
Figura 39 - Comparativo de quantidade de resíduo base seca (toneladas) / área (ha) - D1/D2/D3 .....	66
Figura 40 - Variação do grau de compactação com o número de passadas para os testes realizados com rolo compactador tipo VAP 70.....	68
Figura 41 - Variação do grau de compactação com o número de passadas para os testes realizados com trator de esteiras tipo Komatsu D61.....	68
Figura 42 - Variação da densidade seca com o número de passadas para os testes realizados com rolo compactador tipo VAP 70.....	68
Figura 43 - Variação da densidade seca com o número de passadas para os testes realizados com trator de esteiras tipo Komatsu D61. ....	69
Figura 44 - Comparação entre o filtro de tambor e o filtro de prensa investimentos anuais e cumulativos.....	70
Figura 45 - Matriz de Risco FMEA.....	73

Figura 46 - Matriz de Risco FMEA.....	74
Quadro 1 – Aspectos operacionais: Filtro Tambor versus Filtro Prensa.....	71
Quadro 2 – Segurança, saúde e meio ambiente: Filtro Tambor e com rejeito do Filtro Prensa. .....	72
Quadro 3 - Análise de Risco FMEA.....	73

**LISTA DE TABELA**

Tabela 1- Componentes químico-mineralógicos mais comuns nas lamas vermelhas.....	26
Tabela 2 - Variáveis que afetam a velocidade de filtração relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento.....	41
Tabela 3 - Mecanismos de filtração.....	43
Tabela 4 - Métricas para avaliação qualitativa da possibilidade do evento e severidade dos efeitos.....	59
Tabela 5- Planilha de análise FMEA.....	60
Tabela 6 - Resultado dos ensaios de compactação.....	67
Tabela 7 - Resultado dos testes pilotos com Filtro Prensa (2010).....	67
Tabela 8 - Comparação entre as características de resíduo desaguado por filtro tambor e resíduo desaguado por filtro prensa.....	69

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>FMEA</b>	Failure Modes and Effect Analysis
<b>FPr</b>	Filtro Prensa
<b>FTa</b>	Filtro Tambor
<b>GC</b>	Grau de Compactação
<b>LL</b>	Limite de Liquidez
<b>LP</b>	Limite de Plasticidade
<b>TS</b>	Teor de Sólidos
<b>TTD</b>	Tailing Thickened Discharg
<b>TS</b>	Teor de Sólidos
<b>W<sub>ótima</sub></b>	Umidade ótima
<b><math>\gamma_{d \max}</math></b>	Densidade máxima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo Geral .....	18
1.2.2	Objetivos Específicos .....	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1	BAUXITA .....	20
2.2	TIPOS DE DEPÓSITOS DE BAUXITA.....	23
2.2.1	Depósitos de Bauxita Laterítica.....	23
2.2.2	Depósitos de Bauxita Sedimentar.....	23
2.2.3	Depósitos de Bauxita sobre Rochas Carbonáticas.....	24
2.3	RESÍDUO DE BAUXITA .....	24
2.3.1	Mineralogia do resíduo lama vermelha .....	26
2.4	MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	26
2.4.1	Disposição Convencional .....	28
2.4.2	Empilhamento Drenado .....	29
2.4.3	Disposição Subaérea.....	30
2.4.4	Rejeito Espessado em Pasta.....	31
2.4.5	Empilhamento de Rejeito Filtrado.....	32
2.1.6	Métodos de Disposição da Lama Vermelha .....	33
2.4.7	Disposição por Via Úmida ou Convencional .....	35
2.4.8	Método de Disposição a Seco ou Semisseco.....	36
2.4.9	Empilhamento a Seco .....	38
2.4.10	Disposição a Seco .....	38
2.4.11	Filtração de rejeitos .....	40
2.4.11.1	Filtros de tambores rotativos .....	43
2.1.11.2	Filtros prensa .....	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA .....</b>	<b>49</b>
3.1	COLETA DE DADOS SOBRE O RESÍDUO DO FILTRO TAMBOR E FILTRO PRENSA.....	50

3.2	COMPARAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS DO FILTRO TAMBOR E DO FILTRO PRENSA.....	51
3.3	PISTA TESTE .....	51
3.4	COLETA DE DADOS DA PISTA TESTE .....	52
3.5	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA .....	52
3.6	ANÁLISE DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS FILTROS E DOS RESPECTIVOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA. ....	53
3.7	ANÁLISE DE RISCO QUALITATIVA PELO MÉTODO FMEA .....	53
3.8	DEFINIÇÃO DOS GATILHOS E MODOS DE FALHA .....	53
3.9	PREMISSAS ADOTADAS NA PESQUISA .....	54
3.9.1	Descrição das três alternativas consideradas no avanço de execução das plataformas .....	57
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	63
4.2	RESULTADOS DA PISTA DE TESTE COM RESÍDUO DO FILTRO PRENSA .	66
4.2.1	Ensaio de Compactação Proctor Normal .....	66
4.2.2	Ensaio de Campo .....	67
4.3	ASPECTOS OPERACIONAIS .....	70
4.4	SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE .....	71
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO FMEA .....	72
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens de rejeitos no Brasil surgiu em decorrência das atividades minerárias com a extração de ouro em Minas Gerais. A partir da década de 30 as indústrias investiram na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos com intuito de mitigação de impactos causados pela atividade de mineração. Nessa época notou-se que, com a ocorrência de fortes chuvas, poucas barragens permaneciam estáveis, uma vez que a existência de mão de obra especializada e critérios técnicos eram raros nas fases de construção e operação, assim, ocorriam a construção de pequenos diques feitos por aterros hidráulicos e pequenas bermas.

Segundo Ávila e Sawaya (2011), a partir da década de 40 surgem novos equipamentos com grandes capacidades de movimentação de terra na mineração a céu aberto, então tornou-se possível a construção de estruturas mais seguras e com técnicas de compactação similar à de barragens convencionais. Durante muitos anos a construção foi realizada por equipamentos de lavra de minas e acompanhada por engenheiros de minas especializados e com uso de materiais estéreis oriundo das minas, lançado em forma de aterros.

O desenvolvimento de tecnologias para construção de barragens foi sempre movido pela ocorrência de acidentes com rupturas e com a exigência da sociedade por maior segurança dessas obras. Assim sendo, a partir da década de 50, a geotecnia já estava bem difundida e compreendida, e sua aplicação na construção de barragens de rejeitos já era efetiva. Na década de 70 os aspectos técnicos como estabilidade da fundação, liquefação e percolação, já eram critérios considerados na concepção de projetos no que diz respeito a conhecimentos e controles. Na década de 80 os aspectos ambientais tornam-se cada vez mais exigentes, a engenharia com projetos de barragens cada vez mais em alta, o desenvolvimento de métodos de disposição evolui para redução de potencial de danos das barragens de rejeitos e o aumento da segurança das estruturas de contenção através do melhor conhecimento do comportamento geotécnico dos materiais.

Após os recentes acidentes com barragens de rejeito no Brasil, tornou-se urgente a revisão do processo produtivo e as tecnologias empregadas na disposição dos rejeitos para as mineradoras que desejam evoluir de forma técnica, sustentável e socialmente responsável. Embora a disposição de rejeitos em barragem continue sendo utilizada no processo de mineração, ela não é a única escolha disponível. Uma das possibilidades é o empilhamento do rejeito à seco através de aterros controlados e executados com a compactação de camadas do

rejeito após filtragem, o que configura-se como uma técnica mais adequada quanto aos aspectos socioambientais.

Atualmente existem diversos tipos de sistemas de filtragem de resíduos de minérios, como filtros de tambor a vácuo, filtros prensa de correia, filtros de disco a vácuo e filtros de pano. Desse modo, a escolha do sistema de filtragem depende das características específicas do resíduo, das características operacionais, condições ambientais, restrições regulatórias e os custos do processo. De acordo com Nery (2013), dentre as alternativas existente, percebe-se que as mineradoras e indústrias de beneficiamento de minério têm investido em técnicas como desaguamento por filtros prensa, visando a melhoria do comportamento do rejeito gerado e possibilitando a implantação de novos sistemas de disposição de rejeitos, pois se trata de um equipamento mais atual e que permite a obtenção de uma torta mais seca.

Mediante o exposto, esse trabalho propõe analisar a eficácia do método de filtragem por filtro prensa em relação ao método de filtragem por filtro tambor e seu respectivo método de disposição (Dry Stacking). Foram utilizados testes experimentais tanto com o filtro prensa quanto com o filtro tambor, com rejeitos filtrados gerado na refinaria de alumina do norte do Pará, como alternativa à disposição em forma de aterros. Assim sendo, foram verificados seus principais ganhos quando comparado aos métodos de disposição existentes, com relação a impactos ao meio ambiente e uso do solo, normas reguladoras, saúde e segurança. Para isso, realizou-se a verificação de suas vantagens e desvantagens, a identificação e compreensão dos possíveis modos de falha de um sistema e seus efeitos, de modo a servir como base para adoção de um novo sistema de disposição em forma de aterro compactado. O trabalho como referência o rejeito resultante de uma refinaria de alumina, situada no município de Barcarena no estado do Pará.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O setor minerário contribui fortemente para o desenvolvimento social e econômico do Brasil, o qual apresenta-se em segundo lugar dentre os maiores produtores de minério do mundo, expontando mais de 300 milhões do produto anualmente e com expressiva geração de empregos diretos e indiretos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2022). Todavia, as atividades de exploração de minério geram elevadas quantidades de rejeitos como subprodutos do processo, sendo necessário a adoção de procedimentos para a redução de seu volume e realização de disposição adequada, tendo em vista que sua destinação de forma inadequada oferece grandes riscos sociambientais.

Em decorrência dos acidentes envolvendo o rompimento de barragens de rejeito no Estado de Minas Gerais, a técnica de disposição de rejeito em barragem tem sido cada vez mais motivo de discussão, sobretudo quanto ao risco oferecido por esse tipo de estrutura. Desse modo, as empresas de mineração têm buscado a implantação de métodos alternativos para a disposição dos rejeitos gerados em sua operação, destacando-se o empilhamento do rejeito a seco (STELA, DUARTE e PEREIRA, 2020).

A refinaria de alumina do Norte do Pará, situada no município de Barcarena, realiza o processo de empilhamento do rejeito a seco utilizando o método de filtro tambor, todavia, há interesse por parte desta em aderir o método de filtração por filtro prensa. O filtro tambor configura-se como um aparelho mais tradicional, indicado para elevada capacidade de produção e produtos que geram tortas de filtração firmes, exigindo em muitos casos expressiva quantidade de água de lavagem. Por outro lado, o filtro prensa caracteriza-se como um aparelho mais atual, apropriado para processos que necessitam maior seletividade e menor utilização de água (STELA, DUARTE e PEREIRA, 2020).

A seleção do método mais adequado para ser utilizado por um empreendimento de exploração de minério deve levar em consideração diferentes aspectos, dentre os quais destacam-se a qualidade do filtrado exigida, a capacidade de produção, a disponibilidade e consumo de água e a manutenção requerida. Assim sendo, verifica-se a importância de investigar as diferentes alternativas antes de sua implantação, uma vez que o método mais adequado depende das características específicas do material e do empreendimento, bem como dos resultados esperados por este.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a eficácia da utilização dos métodos de filtração de rejeito e o comportamento geotécnico dos resíduos gerados para utilização em um novo método de disposição, como alternativa à disposição em barragens, a partir do estudo dos resíduos de bauxita oriundo do processo Bayer, da refinaria de alumina da Alunorte, situada no município de Barcarena no estado do Pará.

### 1.2.2 Objetivos Especificos

- Fazer uma comparação dos métodos de disposição de rejeitos de bauxita tanto por filtro tambor quanto por filtro prensa;
- Analisar as principais vantagens e desvantagens, entre os sistemas de filtragem e os métodos de disposição;
- Analisar qualitativamente pelo método FMEA um sistema de disposição com rejeito desaguado por filtro tambor, para apoiar em tomada de decisão de um novo sistema de filtragem de rejeitos com filtros prensa e sua viabilidade para disposição em aterros controlados.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são abordados uma revisão bibliográfica acerca dos depósitos de bauxitas e diferentes métodos de disposição de rejeito.

No Capítulo 3 é apresentado o procedimento metodológico adotado no presente trabalho.

O Capítulo 4 corresponde a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Por último, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões baseadas nos resultados verificados.

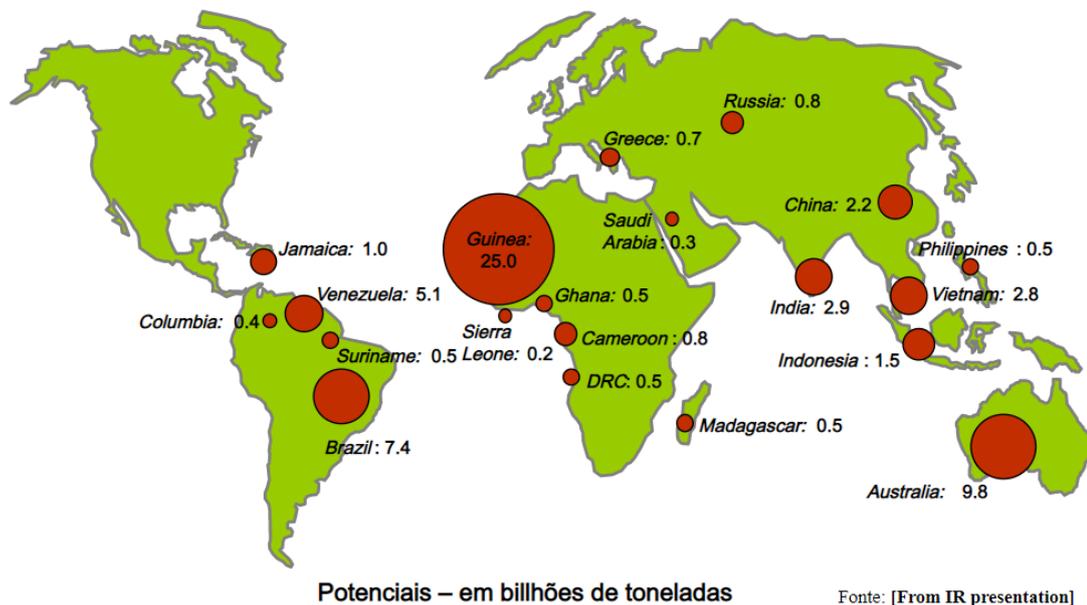
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BAUXITA

A bauxita é o mineral que ocorre em abundância na natureza, no Brasil, suas principais reservas estão concentradas na Amazônia, sendo o estado do Pará o maior produtor nacional, responsável por cerca de 85% da produção brasileira do minério. Em segundo lugar se destaca Minas Gerais, com 14% da produção. Sendo que no estado do Pará, boa parte da produção vem das minas localizadas nos municípios de Oriximiná, Juruti e Paragominas. Em termos de produção mundial, o Brasil, está apenas atrás da Austrália (30,45%) e China (21%), com uma produção de 31 milhões de toneladas (14,1%). Com 3,6 bilhões de toneladas de bauxita, o Brasil possui a terceira maior reserva do minério. Os dados são da Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (em inglês, United States Geological Survey), de 2012.

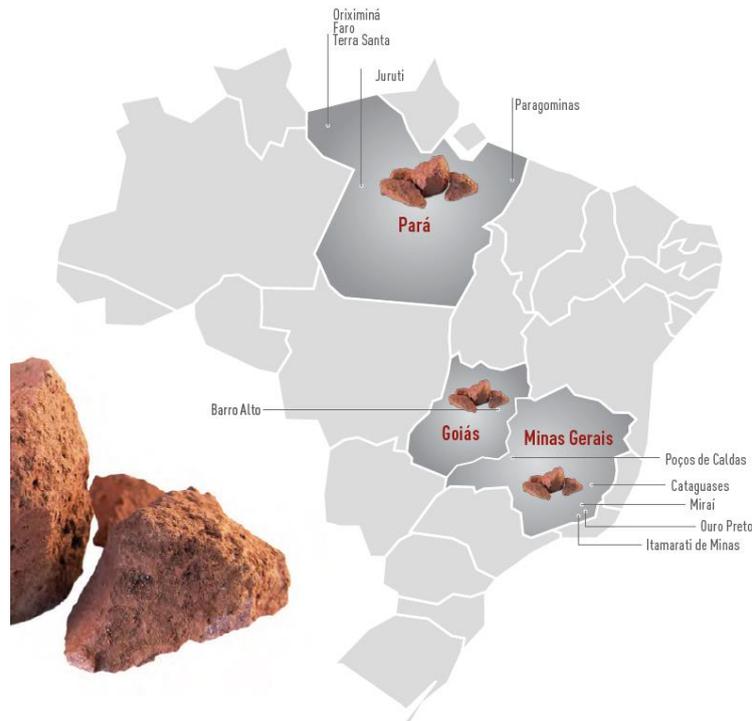
A seguir está a localização dos depósitos de bauxita no mundo e no Brasil, conforme Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 - Países com principais reservas de bauxita.



Fonte: GOTO apud IBRAM, 2007.

Figura 2 - Localização dos produtores de bauxita no Brasil.



Fonte: Abal, 2017.

Ainda sobre a importância deste minério para produção industrial e também sobre a sua composição mineralógica, os autores abaixo afirmam:

A bauxita é um minério de elevada importância industrial, sendo muito utilizada para a obtenção de alumínio metálico e seus compostos, bem como matéria-prima para produção de agentes coagulantes. O Brasil, além de possuir grandes reservas, é também um dos maiores produtores do minério, ocupando lugar de destaque no cenário mundial. Apesar de ser frequentemente descrita como um minério de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados contendo impurezas, sendo a Gibbsita, Boehmita e o Diásporo os seus principais constituintes. (LOUZADA; BIGANSOLLI; LIMA-KÜHN, 2017).

Segundo Carvalho (1989), os primeiros depósitos de bauxita foram localizados no sul da França e na Europa Central, associados, principalmente, a rochas carbonáticas. Posteriormente, foram apontados depósitos em regiões tropicais, com materiais abundantes em alumínio sobre rochas ígneas, metamórficas e na forma de depósitos sedimentares. Sobre a formação dos depósitos de bauxita os autores abaixo afirmam:

Harrossowitz (1926) apud Kotschoubey (1988), identificou dois grupos de bauxita, dos quais um grupo se forma sobre rochas carbonáticas e outro sobre rochas silicáticas.

Lelong et al. (1976) apud Palomino (2017), consideraram as características morfológicas dos depósitos classificando-as em bauxitas lateríticas de cobertura, bauxitas “sedimentares” e bauxita de “carst”, termo introduzido por Vadasz (1951). Bárdossy (1982), apesar de não considerar o ambiente tectônico de formação, apresenta uma classificação em que a litologia do substrato é enfatizada. Nesse caso, são indicados dois grupos fundamentais: os depósitos sobre rochas aluminossilicáticas, este subdividido em depósitos lateríticos e depósitos sedimentares, e os depósitos sobre as rochas carbonáticas.

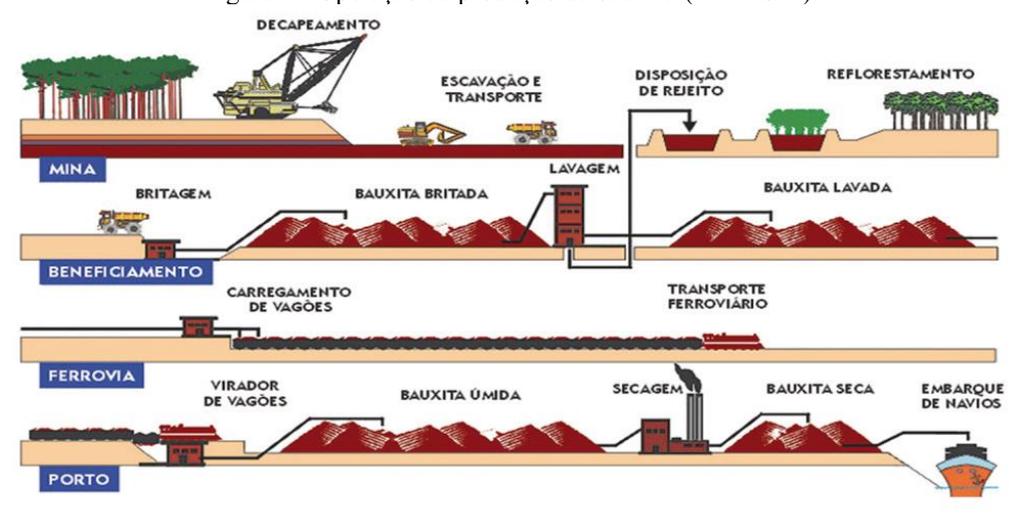
As operações para a produção de bauxita consistem na extração do minério conforme Figura 3. beneficiamento, transporte, secagem e embarque para as refinarias de alumina, conforme Figura 3.

Figura 3 - Extração de bauxita (MRN S/A).



Fonte: VALE.

Figura 4 - Operação de produção de bauxita-(MRN S/A).



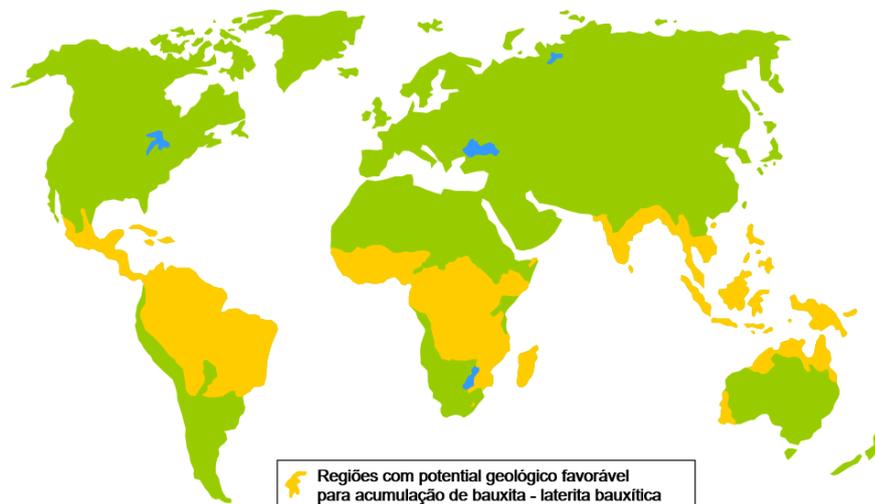
Fonte: Mineração Rio do Norte -MRN.

## 2.2 TIPOS DE DEPÓSITOS DE BAUXITA

### 2.2.1 Depósitos de Bauxita Laterítica

Tiveram sua origem em depósitos autóctones, de variadas rochas alumino-silicáticas formadas sob intenso intemperismo, em condições tipicamente tropical e subtropical úmido (BÁRDOSSY, 1994). Ocorrem em forma de blankets ou corpos lenticulares em zonas aplainadas, relevos tabulares e platôs, submetidos a processos erosivos recentes. Apresentam espessura média de até 10 metros, com variações laterais nos teores de alumínio (Al), ferro (Fe) e silício (Si). As bauxitas são comuns de ocorrerem em perfis lateríticos de grande espessura, formados por meteorização subaérea, intemperismo químico prolongado e lixiviação de rochas de aluminossilicatos (BÁRDOSSY & ALEVA, 1990; FERENCZI, 2001; RETALLACK, 2010). A composição química varia segundo o tempo de formação, onde depósitos mais novos, em geral, são gibbsíticos, enquanto nos depósitos lateríticos mais antigos, comumente, a boehmita é mais presente. Os principais depósitos podem ser encontrados na Austrália, e no Brasil, nesse último em Pitinga, Paragominas, Porto Trombetas, Cataguases, Mirai e Poços de Caldas. A Figura 5 apresenta as regiões potenciais de ocorrência de bauxita laterítica.

Figura 5 - Regiões com potencial ocorrência de bauxita laterítica.



Fonte: Bárdossy & Aleva, 1990.

### 2.2.2 Depósitos de Bauxita Sedimentar

Tiveram origem em depósitos alóctones, sedimentares, sem associação a estratos carbonáticos, com formações de natureza ígnea, metamórfica ou sedimentar. Ocorrem em regiões tectonicamente estáveis, plataformas ou para plataformas, majoritariamente

encontradas na parte basal de coberturas sedimentares, representam entre 1% e 2% das bauxitas (BÁRDOSSY, 1982).

A composição mineralógica aparenta ser independente do seu tempo de formação, sendo principalmente formados por: gibbsita, bohemita e caulinita. Os depósitos são encontrados na região de Tikvvin na Rússia, Arkansas e Sibéria (PALOMINO, 2017).

### 2.2.3 Depósitos de Bauxita sobre Rochas Carbonáticas

Apesar da baixa presença de alumínio, formam depósitos devido à dissolução e lixiviação dos carbonatos, deixando presente o alumínio concentrado (Santos, 2011). Ocorrem comumente em depressões paleocársticas em forma de acumulações de material argiloso entre carbonatos, por exemplo, o calcário e a dolomita (BÁRDOSSY, 1982; PAJOVIĆ, 2009). Seus depósitos comercialmente significativos ocorrem na Europa, Oriente Médio, China e Jamaica.

Sua composição mineralógica varia com o tempo de formação do minério, com abundância de boehmitas, porém em depósitos mais antigos, figuram os diaspóricos e boehmítico- diaspóricos.

Segundo Santos (1989), o alumínio, o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial (PAZ, 2016), visto que devido à sua elevada reatividade química, não é encontrado na natureza em seu estado elementar, mas presente na estrutura de rochas constituídas por compostos oxidados como silicatos e suas argilas e óxidos hidratados (VILLAR, 2002). Os feldspatos, constituintes das rochas ígneas e solos com tal origem, são formados por silicatos de alumínio, dentre os quais, o principal é a caulinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), o qual contém aproximadamente 40% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (BARRAND et al., 1967). Os diversos óxidos hidratados do alumínio são encontrados nas rochas sedimentares, mas não formam mais que aglomerações locais, não representando, portanto, fontes significativas de alumínio.

## 2.3 RESÍDUO DE BAUXITA

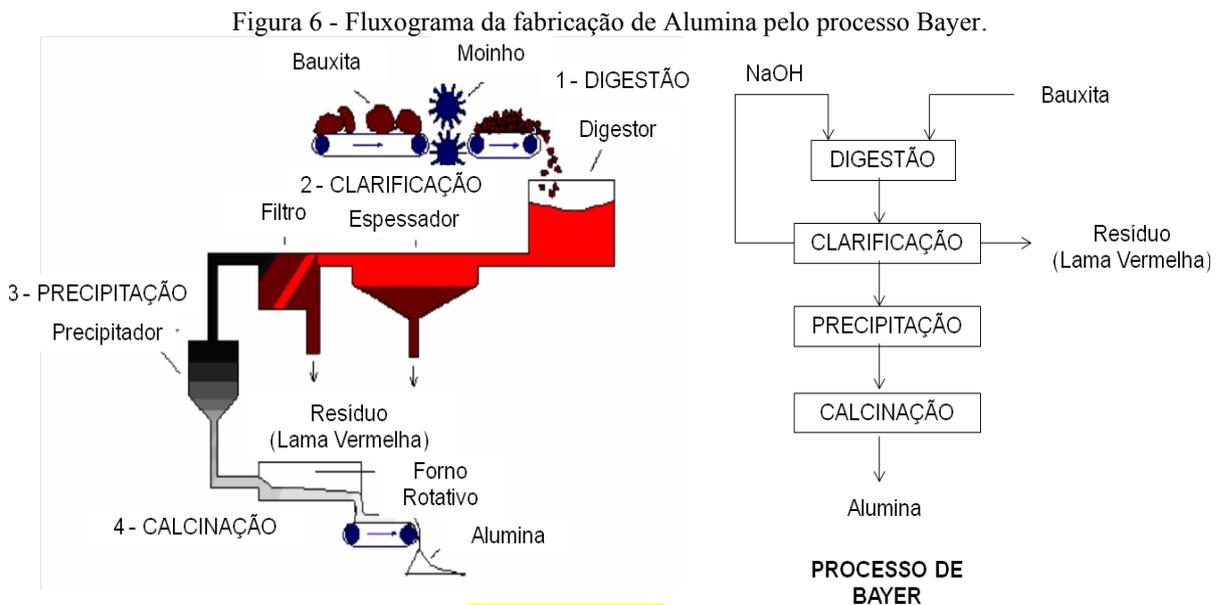
A produção de resíduo de bauxita oriundo do processo Bayer para obtenção da Alumina tem sua contínua geração desde o final do século XIX. No início, o refino da bauxita era realizado por um processo conhecido como Le Chatelier, desenvolvido por Louis Le Chatelier. Segundo Silva Filho et al. (2007), neste método a produção da alumina se dava por meio do aquecimento da bauxita com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de sódio) a  $1200^\circ\text{C}$ , remoção dos aluminatos

formados com água, precipitação do  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (hidróxido de alumínio) através da ação do  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) e, finalmente, o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , formado era filtrado, seco e limpo. Com o passar dos anos, o processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, que teve seu desenvolvimento em 1888 na Alemanha por Karl José Bayer.

O novo processo ofereceu uma redução considerada no custo de produção da  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina). O processo Bayer ainda é utilizado pelas refinarias de bauxita, porém requer um consumo elevado de energia no processo envolvido.

O processo Bayer constitui-se basicamente de 4 estágios (Figura 6):

- DIGESTÃO;
- CLARIFICAÇÃO;
- PRECIPITAÇÃO;
- CALCINAÇÃO.



Fonte: Lima, 2008.

O processo Bayer e seus estágios obedecem a uma sequência percorrida que finaliza com a obtenção da alumina, geração de resíduo e recuperação de NaOH, conforme descreve o autor abaixo:

“O estágio inicial, denominado digestão, envolve num primeiro momento a moagem da bauxita, seguida pela digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão. As condições em que se processa a digestão (concentração, temperatura e pressão), variam de acordo com as propriedades da bauxita”.

A clarificação é uma das etapas mais importantes do processo, nela ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e líquida (licor). Normalmente as técnicas empregadas envolvem espessamento seguido de filtração. O espessamento é um processo de decantação em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores. O objetivo destas unidades é adensar o resíduo, aumentando seu teor de sólidos para recuperar a maior quantidade de NaOH possível e fornecer um “overflow” para a filtragem (SILVA FILHO et al., 2007).

### 2.3.1 Mineralogia do resíduo lama vermelha

Segundo Li & Rutherford (1996), a composição mineralógica da bauxita é um dos fatores mais importantes e que mais influenciam nas propriedades das lamas vermelhas, ou seja, as bauxitas e suas respectivas lamas vermelhas têm uma mineralogia muito similar, mas as quantidades presentes variaram muito (Tabela 1).

Tabela 1- Componentes químico-mineralógicos mais comuns nas lamas vermelhas.

<b>CONSTITUINTES</b>	<b>%EM PESO (base seca)</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25 – 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 – 25
SiO <sub>2</sub>	1 – 25
TiO <sub>2</sub>	1 – 10
Na <sub>2</sub> O	1 – 10
CaO	2 – 8
Perda por calcinação	5 - 15

Fonte: Li & Rutherford, 1996.

Segundo Power et al. (2009), em 1985, 93 anos após o estabelecimento da primeira planta de processo Bayer e o crescente aumento de produção de resíduo de bauxita em um tempo muito curto, seuge a urgência de desenvolvimento de melhores formas de disposição e remediação e deve-se buscar opções de reuso que consumam esses grandes volumes gerados.

## 2.4 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Os resíduos do processo de mineração, incluindo rejeitos (materiais líquidos) e resíduos (materiais sólidos), de modo geral não apresentam valor comercial, fazendo necessário encontrar um local para dispor esse volume. A escolha do método de disposição do rejeito depende da tecnologia utilizada no processo de beneficiamento do minério e tratamento do

rejeito. Conforme Peixoto (2012), em função do teor de sólidos e consistência, os rejeitos podem ser classificados como:

- Rejeito em polpa (slurry): rejeito contendo baixo teor de sólidos e que apresente baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento;
- Rejeito espessado (thickened tailings): rejeito parcialmente desaguado e que apresenta consistência semelhante a polpa, sendo possível o transporte por bombeamento;
- Rejeito em pasta (paste tailings): rejeito espessado que apresenta consistência de pasta e que não flui naturalmente e não drena grande quantidade de água quando disposto no depósito final;
- Rejeito filtrado úmido (wet cake tailings): rejeito com aspecto de uma massa saturada ou quase-saturada não bombeável;
- Rejeitos filtrados secos (dry cake tailings): resíduo com aspecto de uma massa não-saturada não bombeável, contendo grau de saturação geralmente entre 70% e 85%.

A Lei Federal nº 12.305/2010 – 02/08/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define disposição final ambientalmente adequada como sendo: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

A ABNT NBR 13896: 1997 - Aterros de Resíduos não perigosos-Critérios para projetos, implantação e operação, define que: nenhuma instalação pode iniciar o recebimento de um resíduo sem que este tenha sido previamente analisado para determinação de suas propriedades físicas e químicas, uma vez que disso depende seu correto manuseio e disposição.

A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa, em geral, exige grandes áreas para efetuar a disposição e apresenta grande impacto ambiental e, por isso, as empresas têm maiores dificuldades para a realização de novos licenciamentos. A proximidade de áreas urbanas e a pressão pública têm despertado a necessidade de se buscarem alternativas a essa metodologia (GUIMARÃES et al., 2012).

Os métodos para disposição dos rejeitos da mineração incluem:

- Disposição convencional (em reservatórios, como barragens e diques);
- Empilhamento drenado;
- Disposição subaérea;
- Rejeito espessado ou em pasta;
- Empilhamento de resíduo filtrado (dry stacking).

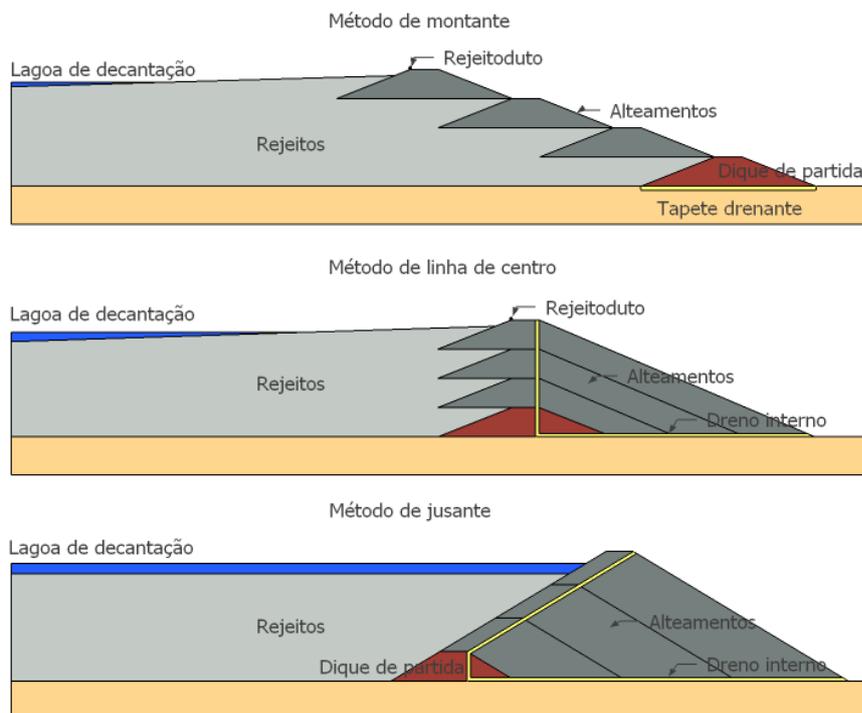
### 2.4.1 Disposição Convencional

Segundo Alves (2018), o método de disposição mais utilizado consiste no lançamento do rejeito na forma de polpa em um reservatório delimitado por uma estrutura de contenção, denominada barragem ou dique.

A resolução ANM nº 95/2022 define barragens de mineração como barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais. Também são consideradas barragens de mineração as estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação.

Geralmente, a construção de uma barragem se inicia com a implantação de um dique de partida e, na sequência, são realizados alteamentos sucessivos de modo a aumentar a capacidade de armazenamento da estrutura. A Figura 7 apresenta os métodos de alteamento de barragens, detalhados na sequência.

Figura 7 - Métodos de alteamento de barragens de rejeito.



Fonte: Métodos construtivos de barragens de rejeitos Apud VALERIUS, M. B. (2014).

Alteamento a montante: método em que os maciços de alteamento se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado. Conforme Lei Federal nº 14.066 de 30 de setembro de 2020, atualmente esse método está proibido no Brasil.

Alteamento a jusante: método em que os maciços de alteamento são construídos para jusante com material de empréstimo ou com o próprio rejeito;

Alteamento por linha de centro: método em que os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo, parte a jusante e parte a montante, em relação à crista da etapa anterior. Métodos de alteamento de barragens de mineração (IBRAM, 2016).

#### 2.4.2 Empilhamento Drenado

De acordo com a Resolução ANM nº 95: 2022, os empilhamentos drenados consistem em estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área. Um exemplo de empilhamento drenado pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Empilhamento drenado.



Fonte: IBRAM, 2016.

No empilhamento drenado, é construído, inicialmente, um dique de partida e o sistema de drenagem de fundo, formado por drenos executados na fundação do reservatório. O sistema

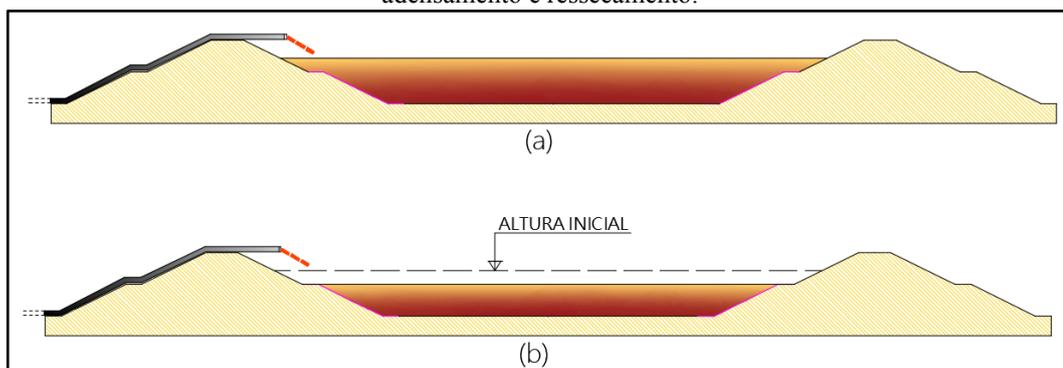
de drenagem de fundo é o que permite o padrão de fluxo gravitacional e subvertical no interior do reservatório, resultando em um depósito sem formação de excessos de poropressão, favorecendo a sua estabilidade geotécnica. Na sequência, os rejeitos arenosos são lançados da crista do dique de partida pela técnica de aterro hidráulico. São construídos alteamentos sucessivos, geralmente pelo método de montante, com os rejeitos retirados da própria praia e compactados com trator de esteira.

Segundo Oliveira Filho e Abrão (2015), a lagoa que pode ser observada na superfície do empilhamento drenado é decorrente praticamente apenas da acumulação de água proveniente da polpa de rejeito, sendo a contribuição de água afluente pequena ou limitada à precipitação na área do reservatório. Deste modo, quando cessadas as operações, a lagoa acaba desaparecendo.

#### 2.4.3 Disposição Subaérea

De acordo com Lima (2006), na disposição subaérea ocorre a disposição do rejeito fino em camadas finas, em ciclos alternados de lançamento e espera (não lançamento), possibilitando o seu adensamento e a drenagem antes do lançamento da camada seguinte. Deste modo, obtém-se um material mais densificado, com baixas poropressões e, eventualmente, com sucção. O aumento do teor de sólidos do rejeito por conta do adensamento por peso próprio e o ressecamento do rejeito por evaporação resulta no aumento da resistência do material. Na disposição subaérea, os rejeitos finos são dispostos sem sofrer qualquer tipo de modificação na planta. Devido à alternância entre o lançamento e a espera neste método, são necessários diferentes reservatórios em número e área suficientes para que a disposição ocorra em um deles, enquanto a drenagem e secagem está ocorrendo nos demais reservatórios, ver detalhes na Figura 9.

Figura 9 - Disposição Subaérea: a) Fase de enchimento: sedimentação e adensamento; b) Fase de espera: adensamento e ressecamento.



Fonte Autor 2023.

#### 2.4.4 Rejeito Espessado em Pasta

Segundo Portes (2013), a técnica de disposição de rejeitos espessados foi introduzida por Robinsky em 1968. Nesse procedimento são empregados espessadores que separam os sólidos do líquido mediante sedimentação de partículas por gravidade. Com isso, aumenta-se a concentração e a percentagem de sólidos em peso através do desaguamento da polpa.

Em algumas situações, são utilizados alguns reagentes para que ocorra a sedimentação das partículas, como os floculantes e os coagulantes, além do controle do pH. De acordo com Gomes (2009), os rejeitos espessados podem ser depositados tanto em áreas planas quanto em terrenos irregulares. Em áreas planas, a disposição do material tende a formar um depósito cônico com taludes uniformes e suaves. Em vales, a pasta viscosa tende a fluir e se adensar, conformando à topografia do terreno ou sendo contida por um barramento. Para acumulação e aproveitamento de água e reagentes do processo, é construído um barramento à jusante.

A construção de barramentos também pode ser necessária, conforme avança o processo de disposição, de modo a aumentar a capacidade de armazenamento de rejeitos. Entre as principais vantagens dos processos de espessamento de rejeitos estão: o grande volume de água reaproveitada em comparação às técnicas utilizadas na recuperação de água em barragens de rejeitos; a menor susceptibilidade à liquefação do material; maior densidade e estabilidade dessas estruturas; menores impactos ambientais; e maior recuperação dos reagentes utilizados nos processos de tratamento, ver detalhes da disposição de rejeito de minério de ferro em pasta conforme Figura 10.

Figura 10 - Disposição de rejeito de minério de ferro em pasta.



Fonte: Slottee et al., 2005.

#### 2.4.5 Empilhamento de Rejeito Filtrado

Segundo Portes (2013), a filtração de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos por meio da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido. Nesta técnica, os rejeitos são espessados até certa consistência, através de espessadores e, na sequência, são filtrados por meio de filtros a vácuo ou de pressão positiva. Então, a água proveniente das etapas de espessamento e filtração pode ser reutilizada nos processos minerários. O teor de umidade do produto da filtração, chamado torta filtrante (filter cake), é um dos fatores mais importantes para o manejo posterior desse material.

De acordo com Gomes (2009), após o processo de filtração, os resíduos apresentam baixo teor de umidade e são transportados em caminhões ou em correias transportadoras até o local de disposição final. Neste local, os resíduos são lançados, espalhados e compactados em camadas ou estabilizados em pilhas. Apesar dos custos elevados associados à planta de desaguamento, transporte e disposição final, estes custos são amortizados na fase de desativação do empreendimento.

Oliveira Filho e Abrão (2015) destacam a divisão da pilha em duas zonas para locais com a estação chuvosa bem definida. Desta forma, a disposição dos resíduos na parte mais externa do depósito é realizada durante a estação seca, executando a compactação desse material conforme especificações de aterro similares à construção de uma estrutura de contenção. Com isso, os resíduos compactados durante a estação seca, na zona estrutural, funcionam como espaldares para a contenção dos rejeitos filtrados que vierem a ser depositados na porção mais interna do depósito (zona não-estrutural) durante a estação chuvosa. Os materiais depositados na zona não-estrutural podem ser lançados e espalhados ou levemente compactados na porção mais interna da pilha de rejeitos filtrados.

Conforme indicado por Alves (2018), podem ser aplicadas diferentes artificios para se atingir o teor de umidade e a densidade desejados na pilha de rejeito filtrado. Uma das opções mais usuais é a disposição de finas camadas de rejeito filtrado, por correia ou caminhão, para posterior compactação, especialmente nas zonas estruturais. A disposição em camadas finas permite a evaporação pela ação de ventos e da radiação solar e a compactação proporciona o aumento da densidade e, conseqüentemente, o aumento da estabilidade geotécnica da pilha. Ver detalhes da disposição de rejeito filtrado conforme Figura 11.

Figura 11 - Disposição de rejeito filtrado.



Fonte: Alunorte, 2023.

### 2.1.6 Métodos de Disposição da Lama Vermelha

Segundo Silva Filho (2007), “os métodos convencionais de disposição de lamas, ou métodos úmidos, são assim denominados devido à grande quantidade de água de processo que segue com o material sólido para disposição”.

Os métodos úmidos de armazenamento de lama vermelha demandam a construção de grandes diques devido ao baixo teor de sólidos da lama vermelha resultante após passar pelo processo de refinamento da bauxita para a obtenção da alumina. No local de disposição ocorre uma separação do material sólido e do líquido, devido a sedimentação da lama vermelha e o surgimento de um sobrenadante alcalino.

No Brasil, o resíduo de processamento da bauxita na produção de alumina foi amplamente disposto por via úmida até meados dos anos 80. “Nesse método os resíduos gerados são diluídos em água com teor de sólidos de até 30%, e bombeados para grandes áreas de disposição compostas por diques ou barragens” (SILVA,2020).

Os métodos de disposição de lama vermelha empregados e os impactos ambientais relacionados ao seu descarte inadequado têm sido discutidos por diferentes autores (SILVA FILHO et al., 2007; POWER et al., 2011; KLAUBER et al., 2011; GRÄFE et al., 2011; EVANS et al., 2012; WORLD ALUMINIUM, 2015; VAN DEURSEN, 2016).

A disposição da lama vermelha proveniente do processamento da bauxita pelo processo Bayer, em particular, representa um grande desafio para a indústria de alumina devido ao significativo volume gerado e à sua elevada alcalinidade, o que torna urgente a necessidade de alternativas tecnológicas que possam ser empregadas em escala industrial. Segundo Evans et

al., (2012), inicialmente, o resíduo de bauxita gerado nas plantas de produção de alumina era, por vezes, estocado em pilhas localizadas adjacentes às plantas de beneficiamento, e minas exauridas eram preenchidas com o resíduo. Com o passar do tempo, melhorias decorrentes da gestão, controle e monitoramento dessas áreas foram postas em prática, com o intuito de minimizar os riscos de contaminação tornando mais simples e eficiente a recuperação dessas áreas.

Em outros casos, o resíduo era descartado em vales represados, estuários, corpos hídricos e até mesmo nos oceanos, também citado como “offshore disposal”. De acordo com Silva Filho et al. (2007), a prática de descarte de resíduo em corpos hídricos receptores ou oceanos, motivada pela escassez de área para disposição, deixou de ser realizada por grande parte das refinarias de alumina persistindo apenas em países como Japão e Itália (VICK, 1983; AGRAWAL et al., 2004; HYUN et al., 2005).

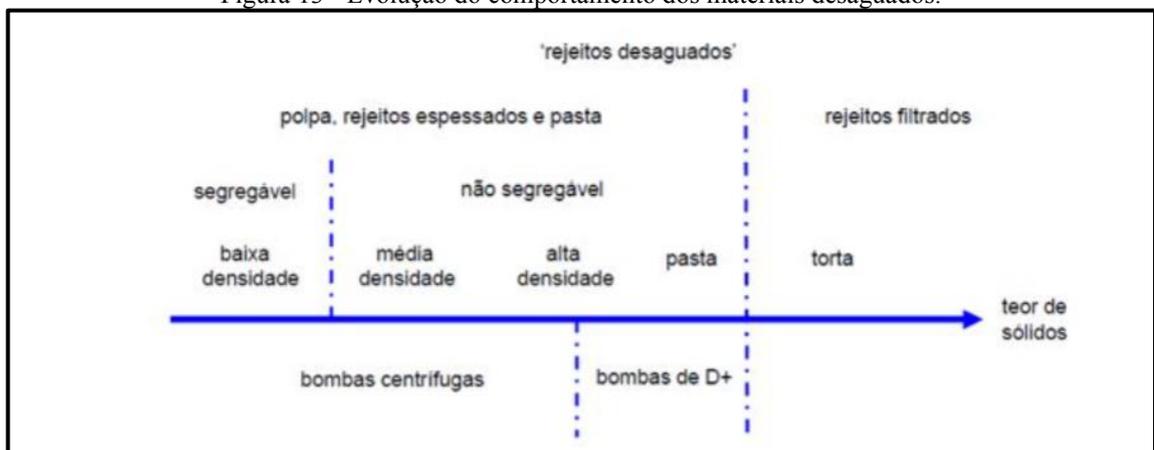
Neste sentido, Davies (2011) relata a tendência em se dispor lama vermelha em forma de polpa de alta densidade com teor de sólidos (TS variando entre 57% e 68%), em forma de pastas minerais (TS entre 60 e 70%) ou ainda em tortas (TS entre 75 e 85%). Ver detalhes da evolução do teor de sólidos Figuras 12 e 13.

Figura 12 - Evolução do comportamento do teor de sólidos.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 13 - Evolução do comportamento dos materiais desaguados.



Fonte: PORTES, 2013.

#### 2.4.7 Disposição por Via Úmida ou Convencional

Os métodos de disposição de lamas por via úmida são assim denominados por conduzir grande quantidade de água de processo em conjunto com os rejeitos sólidos até a sua disposição que pode ser por bombeamento ou gravidade, como mostra a Figura 14.

No Brasil, o rejeito de processamento da bauxita na produção de alumina foi amplamente disposto por via úmida até meados dos anos 80. Nesse método os resíduos gerados são diluídos em água com teor de sólidos de até 30%, e bombeados para grandes áreas de disposição compostas por diques ou barragens. O grande volume gerado de resíduo caracterizado pelo baixo teor de sólidos obtido na solução é armazenado em sistemas de disposição compostos por extensas barragens ou bacias. A ocorrência de separação de fases no local de disposição é comum à prática. A fase sólida do rejeito, naturalmente sujeita à sedimentação, é segregada da fase líquida, dando origem ao sobrenadante alcalino (SILVA FILHO et al., 2007).

Figura 14 - Disposição via úmida em barragem.



Fonte: Ávila e Sawaya, 2011.

Como principais desvantagens cita-se o acúmulo de água no interior dos reservatórios, com maior risco geotécnico associado, salientam-se aqui os casos de rompimento de barragens em Miráí, em 2007, Mariana, em 2015 e Brumadinho, em 2019. Outra característica da metodologia é a baixa concentração de sólidos no rejeito quando comparada aos métodos de disposição que incluem secagem por evaporação ou desaguamento mecânico, e, portanto, menor capacidade de estocagem de rejeitos. Além disso, a formação de áreas com acúmulo de materiais finos e pouco consolidados representa uma desvantagem para execução de atividades

necessárias ao fechamento e recuperação ambiental das barragens ou depósitos, tornando o processo lento.

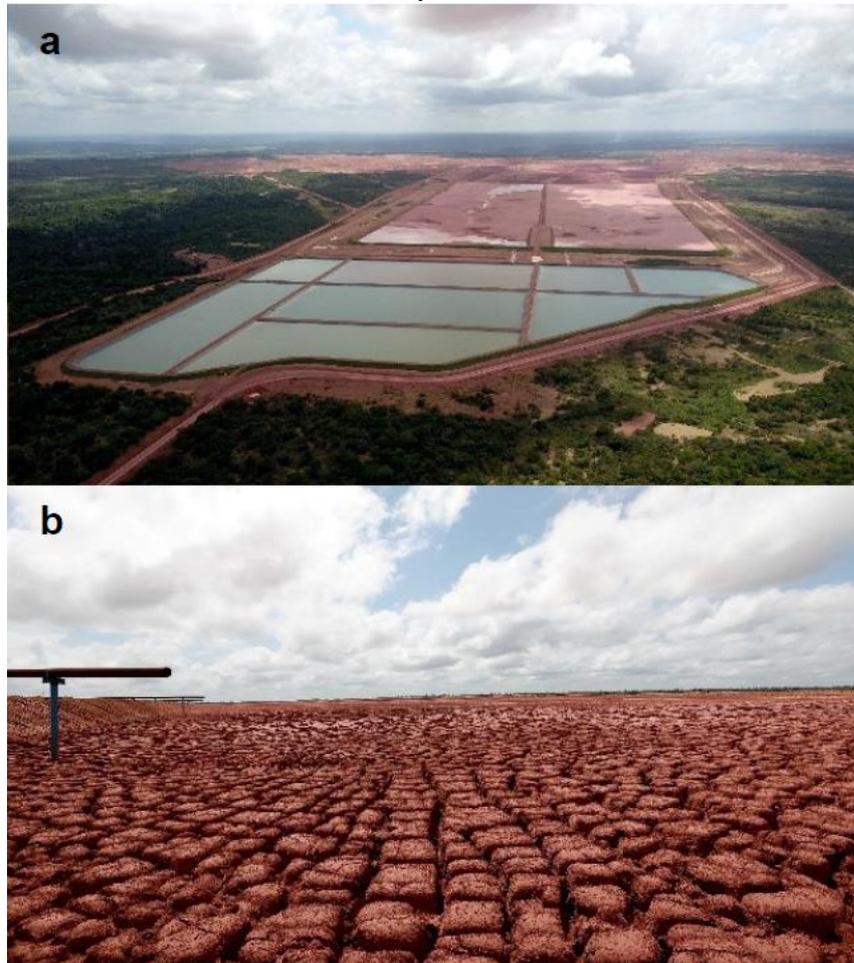
#### 2.4.8 Método de Disposição a Seco ou Semisseco

Na disposição semisseca de rejeitos de mineração são adotados ciclos de deposição de forma controlada em que lançando os rejeitos em camadas de deposição garantem tempo suficiente à secagem superficial do material lançado. A existência de dispositivos drenantes no interior do depósito para coleta de efluente infiltrado pode ou não existir. Apesar disso, em geral são instalados dispositivos extravasores contrários aos pontos de lançamento, responsáveis pela coleta e direcionamento da fase líquida sobrenadante.

De acordo com Ritcey (1989), parte da água presente nos rejeitos é perdida, seja por infiltração em camadas anteriormente lançadas, ou por processo evaporativo. Os lançamentos são realizados tipicamente a partir de múltiplos pontos do reservatório, homogeneizando as camadas de secagem e minimizando a ocorrência de erosões em camadas subjacentes.

Segundo Nery (2013), dentre os principais métodos de disposição de rejeitos finos semissecos empregados na mineração podem ser citados o método de disposição de lama espessada (TTD – Tailing Thickened Discharge) onde o rejeito é disposto com teor de sólidos em torno de 40%, a partir de um ponto mais alto do depósito, com a finalidade de obter grandes áreas de evaporação (Figura 15).

Figura 15 - Sistema de disposição de rejeitos TTD (a) visão geral (b) reservatório-Mineração Paragominas-Hydro.



Fonte: ICSOBA, 2019.

Outro método de disposição semisseco largamente empregado na atividade minerária é a disposição em pasta (paste disposal), que consiste no espessamento prévio do rejeito até uma mistura densa e viscosa, de modo que não apresente segregação durante o transporte. Essa tecnologia é explorada nos trabalhos de Newman et al. (2001), Biesinger & Slottee (2011), Fitton & Seddon (2013), Cavalcanti & Palkovits (2013) e Van Deursen (2016).

As desvantagens do método de disposição semisseco são menores quando comparadas àquelas elencadas para a disposição via úmida, devido ao gradual aumento na concentração de sólidos, permitindo a ampliação da capacidade de armazenamento das barragens de rejeitos, embora ainda necessite de grandes áreas para o rodízio e secagem na disposição. Outra vantagem decorrente da redução da água armazenada no depósito é a redução no tempo necessário ao adensamento do rejeito depositado, impactando positivamente nas atividades de reabilitação e descomissionamento do reservatório.

#### 2.4.9 Empilhamento a Seco

O método de empilhamento a seco (dry stacking) figura entre os mais utilizados na disposição de lama vermelha, e consiste no espessamento por meio de filtros rotativos, chegando a teor de sólidos entre 55 e 60% (ÁVILA, 2012). O conceito de empilhamento de resíduos industriais teve início na década de 60, como o sistema desenvolvido nas minas de Kidd Creek, no Canadá. O sistema prevê o desaguamento do rejeito com consequente aumento de teor de sólidos e reaproveitamento da água para o processo. Seu descarte é realizado em ciclos de disposição e secagem com alternância entre as frentes de disposição de forma difusa, formando finas camadas que favorecem a secagem por evaporação e drenagem (SILVA FILHO et al., 2007). De acordo com a World Aluminium (2015), o rejeito espessado é disposto formando uma pilha com ângulo de repouso entre 2 e 6%, podendo atingir superfícies ainda mais íngremes a depender da reologia do resíduo, teor de sólidos no lançamento e condições do relevo. Operação de disposição de resíduo de bauxita pelo método empilhamento a seco dry stacking, conforme Figura 16.

Figura 1 - Empilhamento a seco dry stacking, resíduo com T.S 60% oriundo do filtro tambor (Alunorte).



Fonte: Alunorte, 2018.

#### 2.4.10 Disposição a Seco

A disposição em tortas de resíduo filtrado ( $TS > 65\%$  anterior à disposição) é apontada por autores (POWER et al., 2011; NERY, 2013; KINNARIEN et al., 2015) como uma das técnicas mais atraentes quando considerados os aspectos ambientais associados à disposição de resíduos, além da possibilidade de utilização futura dos sólidos.

O emprego de tecnologias de filtragem possibilitou a disposição de rejeitos de mineração após intenso desaguamento, em estado não saturado, diferentemente das formas

convencionais em lama ou pasta. De acordo com Nery (2013), essa tecnologia permite a dispensa da construção de barragens ou bacias de contenção para armazenar rejeitos, uma vez que o rejeito filtrado é submetido ao transporte, lançamento, espalhamento e compactação, formando uma pilha de aterro compactado, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Disposição a seco dry cake disposal, operações de terraplenagem no resíduo de bauxita oriundo do filtro prensa.



Fonte: Alunorte, 2023.

Contudo, para avaliação da viabilidade técnica dessas pilhas com rejeito filtrado é fundamental a análise das distâncias médias de transporte, uma vez que seu transporte se dá por correias transportadoras ou caminhões basculantes, representando um custo significativo de sua operação. Além disso, conforme explicado por Nery (2013), as condições climáticas da região onde se encontram essas estruturas têm importância singular na definição dos projetos, em especial no que diz respeito aos regimes de chuvas intensas, uma vez que as condições de compactação, sistemas de drenagens superficial e interna, e trafegabilidade nos acessos e nas frentes de disposição são cardeais para a operação dessas pilhas.

Nesse caso, segundo a referida autora, a construtibilidade das pilhas devem ser avaliadas de forma a serem criadas regiões zoneadas para diferentes condições de trabalhabilidade decorrente da condição climática, para obedecer aos critérios construtivos de umidade e compactação. Deve-se segregar áreas específicas de operação que formam uma espécie de “bacia”, cujo papel principal é conter os rejeitos dispostos durante períodos chuvosos, e assegurar estabilidade global à pilha. Dentre as principais vantagens da operação de sistemas de disposição a seco de lama vermelha filtrada podem ser citados:

- Maior estabilidade da pilha em aterro compactado;

- Elevada densidade do resíduo disposto;
- Maior capacidade dos depósitos;
- Elevada recuperação de água e insumos do processo;
- Maior controle de construção e operação;
- Reduzido potencial de risco geotécnico;
- Menores impactos ambientais, com melhores condições para o fechamento progressivo.

#### 2.4.11 Filtração de rejeitos

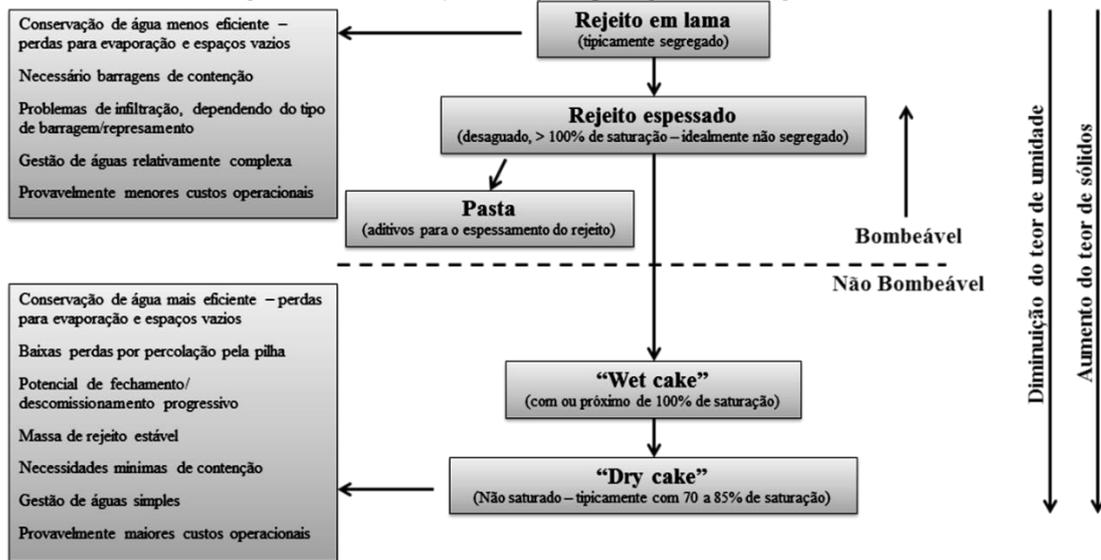
Através do processo de filtração obtém-se um material resultante com características físicas que variam de acordo com o tipo de sistema de filtragem empregado, essas variações são determinantes para definição do tipo de sistema de disposição a ser empregado na destinação final de um resíduo.

Conforme citado por Davies (2011), os rejeitos filtrados podem ser filtrados a úmido, denominados de “wet cake”, ou filtrados a seco “dry cake”. O rejeito filtrado a úmido apresenta grau de saturação próxima de 100%. O rejeito filtrado a seco apresenta de 70 a 85% de grau de saturação.

Define-se filtragem como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que atravessa o meio filtrante é denominado filtrado e os sólidos retidos constituem a “torta”. Segundo Guimarães (2011), a filtragem de rejeitos é muito utilizada nas minerações do deserto do Atacama, na região norte do Chile, para reduzir as perdas de água devido a sua escassez na região.

A seguir é apresentada a classificação do rejeito em função do grau de desaguamento, com a nomenclatura padrão da indústria. Rejeitos filtrados são tipicamente tidos como tortas secas ou “dry cake”, mostrado na Figura 18. Este material tem umidade suficiente para permitir maior espaço de poros a ser preenchidos com água, mas não tanto que impeça a compactação ótima do material.

Figura 2 - Classificação do rejeito pelo grau de desaguamento.



Fonte: Apud Nery (2013) adaptado de Davies , 2011.

Segundo Guimarães (2011), ocorrem diversas variáveis que podem prejudicar o desempenho do processo de filtragem, sendo agrupadas em quatro categorias (relacionadas aos sólidos, à torta/filtrado, à polpa e ao equipamento), conforme apresentado no Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis que afetam a velocidade de filtragem relativas ao sólido, torta/filtrado, polpa e ao tipo de equipamento.

Sólido	Torta/filtrado	Polpa	Equipamento
Área superficial específica	Espessura da torta	Taxa de alimentação	Ciclo
Distribuição granulométrica	Porosidade do leito	Porcentagem de sólidos	Nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão
Forma geométrica	Permeabilidade do leito	Temperatura	Meio filtrante
Propriedades de superfície	Viscosidade do filtrado	Viscosidade	Geometria dos componentes
Massa específica		pH	Nível de agitação
		Adição de reagentes auxiliares	
		Presença	

Fonte: Guimarães, 2011.

Algumas observações foram feitas por Guimarães (2011) com relação às variáveis apresentadas, a saber:

- A taxa de filtração aumenta com a diminuição do ciclo de filtração, porém pode ocasionar a elevação da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga do filtro;
- O aumento da temperatura da polpa promove a redução da viscosidade do filtrado, o que favorece a filtração. Porém esta operação (através da aplicação de vapor superaquecido) não é usual em operações industriais por ser excessivamente dispendiosa;
- Quanto maior a concentração de sólidos das polpas, melhor a filtração. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação (30% a 45%) para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração;
- Partículas com distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores, fazendo com que o líquido atravesse o meio filtrante com maior facilidade, aumentando a velocidade de filtração e reduzindo a umidade da torta;
- O pH da polpa está relacionado ao estado de dispersão/agregação das partículas, sendo que quanto mais elevado o pH, maior o estado de dispersão dos sólidos na polpa. Sendo maior a dispersão, menor o fluxo de fluido filtrado e maior a umidade da torta. O estado de agregação das partículas é menor;
- Para reduzir a tensão superficial do líquido e conseqüentemente auxiliar na passagem do fluxo, são utilizados reagentes auxiliares de filtração;
- As lamas apresentam um efeito negativo na filtração uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Dessa forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração, algumas vezes são adicionados coagulantes e floculantes nos tanques.

A seguir é apresentado na Tabela 3 alguns mecanismos de filtração e os principais fornecedores atuantes no mercado. Dentre os tipos de filtros apresentados, será apresentada, nos itens a seguir, uma breve descrição dos filtros tambor e dos filtros prensa, por serem os tipos de filtros substituídos e adotado após teste, na filtração da lama vermelha no local de estudo.

Tabela 3 - Mecanismos de filtração.

<b>Tipos</b>	<b>Características</b>	<b>Modelos de Filtros</b>
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do Líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o Desaguamento	Ceramec

Fonte: Guimarães, 2011.

#### 2.4.11.1 Filtros de tambores rotativos

Os filtros de tambor rotativos são projetados para obter maior capacidade de filtração por área construída, assegurando torta mais seca e filtrado de excelente qualidade. Ele pode ser dotado de meio filtrante especial e processo de lavagem exclusivo. A filtração inicia-se quando o setor está submerso na bacia que contém a polpa. À medida que o líquido passa através do meio filtrante, deixa os sólidos retidos no mesmo, formando assim, a camada de torta (carga).

Os filtros de tambor rotativos são normalmente utilizados para as seguintes situações:

- Para polpas com sólidos que não tendem a sedimentar rapidamente e permanecerão em suspensão uniforme sob agitação delicada;
- Para tortas que não requerem períodos de secagem longos para alcançar valores assintóticos de umidade;
- Quando um único estágio de lavagem for suficiente para remover os contaminantes residuais da torta ou produzir a recuperação máxima de filtrado;
- Para filtrado que não requer uma separação afiada entre o filtrado matriz e o filtrado da lavagem.

O filtro de tambor rotativo é formado por um tambor na horizontal que fica semi-submerso sobre um cilindro cortado ao meio na horizontal, com raio maior que o do tambor, formando uma espécie de banheira que irá receber e acondicionar a lama. No fundo desse semi-cilindro há um agitador para evitar que a lama se sedimente no fundo. A superfície do tambor

é toda furada com furos circulares pequenos agrupados em células horizontais de forma a permitir o controle de pressão em cada furo. Cada célula está conectada por 1 ou 2 dutos que vão até a válvula de controle. Quando o duto passa pela zona de formação da torta, ele recebe uma pressão negativa e todos os furos daquela célula succionam.

O filtro de tambor rotativo possui uma válvula de controle que determina a área da superfície do tambor que irá ficar em determinada zona. Os diversos dutos dentro do filtro de tambor rotativo giram concomitantemente com o filtro, e na medida em que giram, eles entram e saem de zonas com vácuo, pressurizadas ou sem pressão, controladas pela válvula de controle. O líquido filtrado succionado entra pelos furos e dentro das células é direcionado aos dutos, onde irá sair pela válvula na zona em que estiver passando. A superfície do tambor é envolta por uma manta de filtração, que impede o entupimento dos furos e distribui sobre toda a superfície da célula a sucção. A torta se forma sobre a manta de filtração.

Após a filtração, a torta formada pode ser removida por raspadores, rolos, cintas de descarte, fios de descarte ou jatos de água ou ar. Os jatos de água ou ar podem também ser usados junto com outro tipo de removedor de torta para auxiliar a remoção. A Figura 19 apresenta um exemplo de filtro tambor.

Figura 19 - Exemplo de filtro tambor.



Fonte: Avery and Wilson, 2013 — R.J.

#### *2.1.11.2 Filtros prensa*

A filtragem a pressão é caracterizada pela aplicação de uma pressão positiva (e não o vácuo) na polpa e, por possuir um ciclo descontínuo, sua operação é conduzida em batelada. Uma das principais vantagens da filtragem a pressão é a produção de tortas com menor teor de

umidade, em comparação com outras tecnologias de filtração. Os filtros prensa também oferecem eficiência na lavagem da torta para recuperação de soda (AVERY e WILSON, 2013).

A Figura 20 apresenta um filtro prensa de placas verticais, denominado também de filtro prensa horizontal. Ele é constituído de um número muito grande de placas. Cada placa possui um recesso nos dois lados, que juntamente com a placa vizinha forma uma câmara. Estas placas são revestidas pelo meio filtrante.

Figura 20 - Filtro prensa de placas verticais.

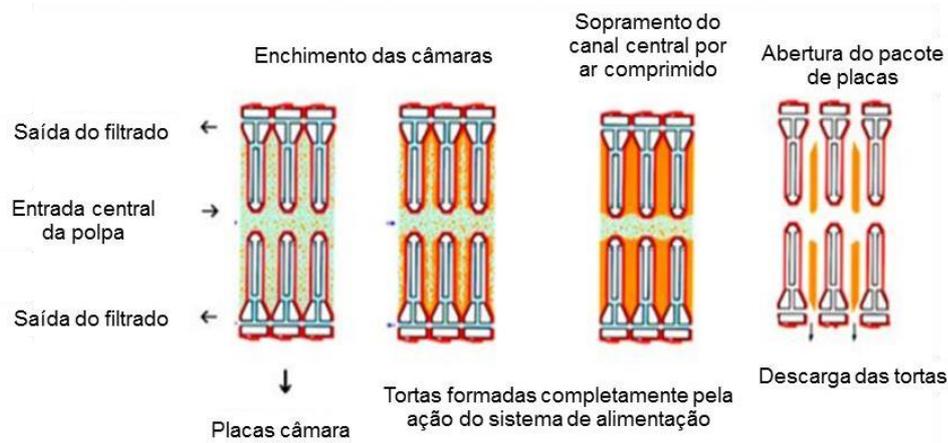


Fonte: Andritz Separation, 2013.

Os filtros prensas horizontais possuem basicamente o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se de acordo com características de cada fabricante. Podem ser construídos com dispositivos auxiliares para permitir total automação requerendo mínima intervenção do operador. É uma tecnologia apropriada para filtração de lamas. Existem placas de diferentes modelos, tipos de câmara e diafragma. Os formatos das placas variam de 250 x 250 até 2500 x 2500 mm.

As etapas básicas do ciclo de operação do filtro prensa horizontal com placas tipo câmara Figura 21 apresenta são: enchimento, filtração sob pressão máxima, e descarga de torta. O enchimento das câmaras com a polpa ocorre através do sistema de alimentação até formação completa das tortas. A pressão de alimentação é mantida por um tempo preestabelecido no sentido de extrair o maior volume de filtrado. A pressão obriga o filtrado a atravessar o meio filtrante que escoar pelas ranhuras das placas e é conduzido para fora do filtro. Após desligamento, se procede a expulsão do canal central através da injeção de ar comprimido, seguindo-se para a lavagem da torta (quando aplicável). Em seguida o filtro é aberto e a torta descarregada.

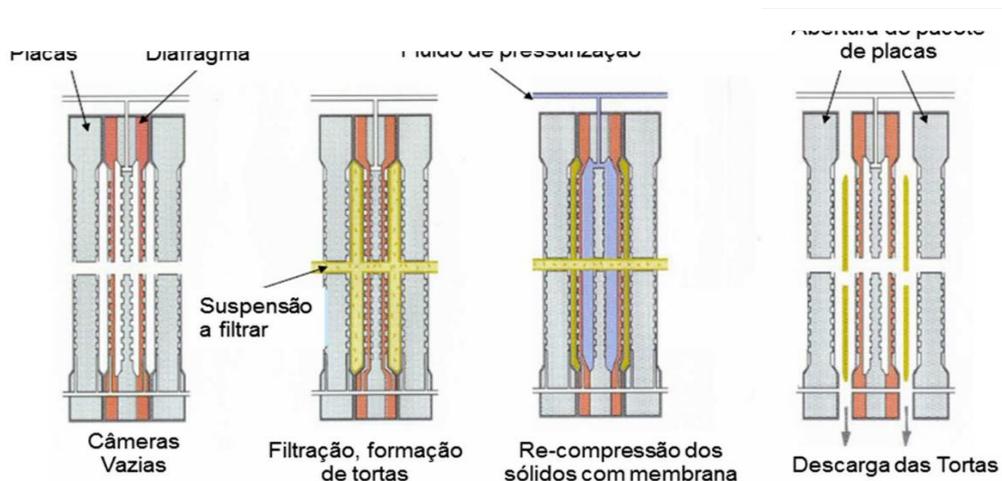
Figura 21 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara.



Fonte: Guimarães, 2011.

O filtro prensa com placas tipo diafragma é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas diafragma são revestidas por um diafragma elástico, formando assim um pacote de placas denominado misto. Após o enchimento das câmaras com a polpa, as bombas de alimentação são desligadas e os diafragmas são pressurizados hidráulicamente a fim de extrair mais filtrado progressivamente. A vazão de filtrado aumenta com a elevação da pressão de pressurização, sem que ocorra alimentação de polpa ao filtro prensa. Com o sistema diafragma, o processo de separação sólido líquido habitualmente se reduz no tempo de filtragem. Transcorridos os tempos de pressurização ocorre a despressurização dos diafragmas com posterior descarga das tortas (Figura 22).

Figura 22 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo diafragma.



Fonte: Adaptado de Andritz, 2013.

O filtro prensa de placas horizontais, também denominado filtro prensa vertical, conforme consta na Figura 23, é uma tecnologia recente de filtração. A configuração vertical economiza área de piso. Caracterizam-se por produção de tortas com mais baixa umidade e menor custo de operação, porém com alto custo de investimento (VALADÃO, 2008).

Figura 3 - Filtro de pressão vertical convencional.



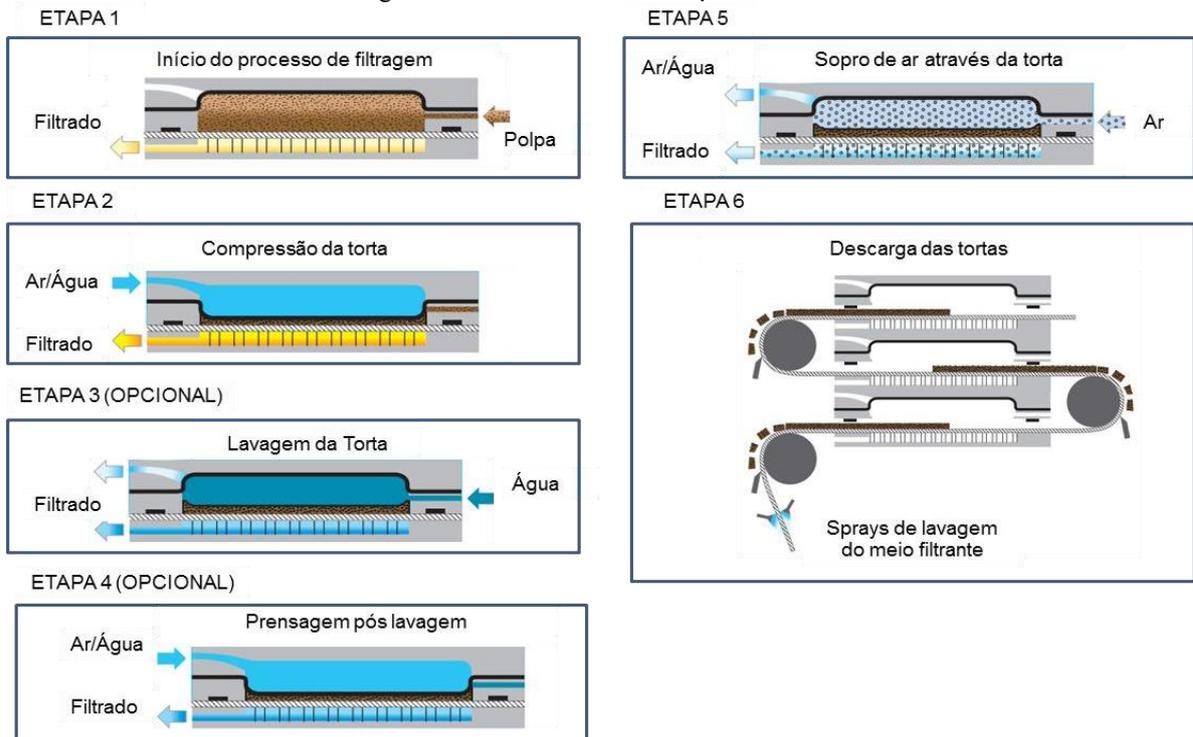
Fonte: Guimarães, 2011.

O ciclo de filtração de um filtro de pressão vertical convencional consiste nas etapas descritas a seguir e é mostrado na Figura 24:

- Etapa 1: A polpa é bombeada para dentro de todas as câmaras simultaneamente e tortas são formadas e ao mesmo tempo o filtrado começa a fluir;
- Etapa 2: Água ou ar altamente pressurizado preenche os diafragmas em todas as câmaras, comprimindo as tortas;
- Etapa 3: Água de lavagem é bombeada para o interior de todas as câmaras, se a lavagem da torta é requerida;
- Etapa 4: Após a lavagem da torta, água ou ar altamente pressurizado preenchem novamente todos os diafragmas para máxima recuperação do filtrado;
- Etapa 5: Ar comprimido é insuflado através das tortas, reduzindo ainda mais a umidade;
- Etapa 6: Todas as placas do filtro abrem-se automaticamente e a esteira filtrante move-se para frente proporcionando descarga total das tortas. O meio filtrante é em seguida lavado;

A pressão de operação durante a alimentação da suspensão é  $8 \times 10^5$  Pa e durante a compressão da torta,  $1,6 \times 10^6$  Pa.

Figura 4 - Ciclo de um filtro de pressão vertical.



Fonte: Guimarães, 2011.

Segundo Nery:

“Após a filtragem pelo filtro prensa, as tortas de resíduo formadas, com alta densidade, são descarregadas das câmaras filtrantes e, ao caírem, se quebram em pedaços, formando uma pilha de material solto, de densidade baixa, da ordem de 13 a 15 kN/m<sup>3</sup>. Para se conseguir uma maior densidade na disposição deste material, de forma a ocupar menores volumes, bem como ter uma maior resistência da pilha, deve-se promover a compactação do resíduo, como em uma obra de terraplenagem. Sendo assim, é importante conhecer o comportamento geotécnico deste resíduo quando compactado”.

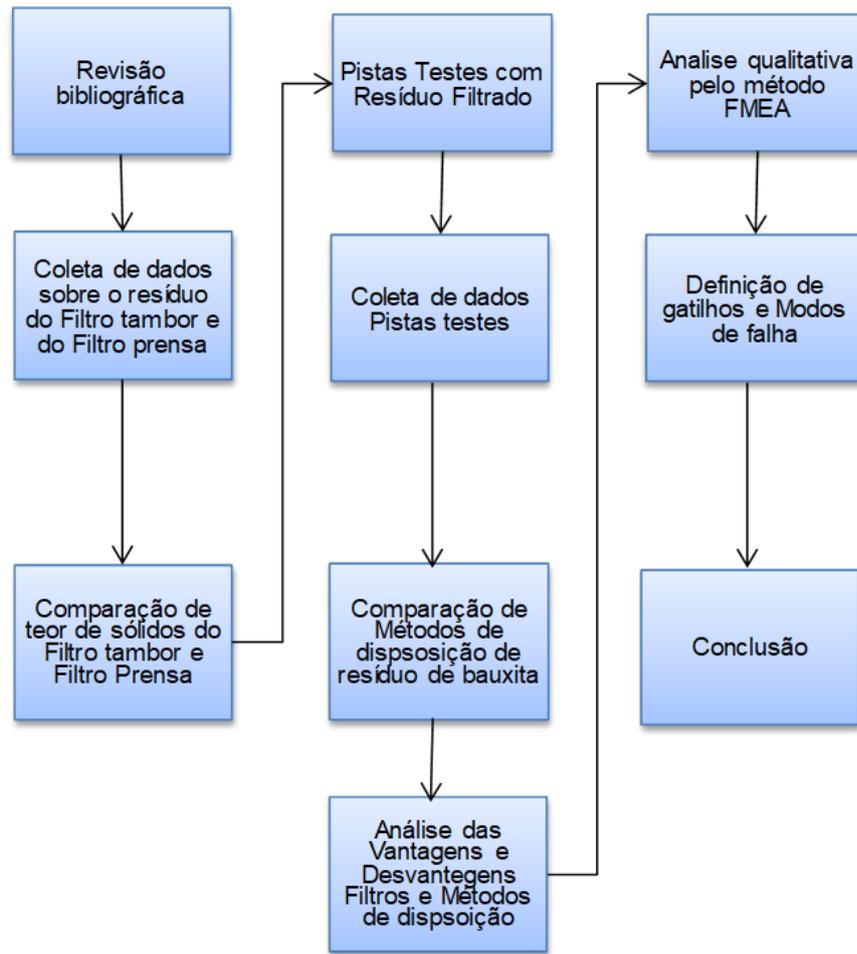
### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta pesquisa aborda os sistemas de disposição de resíduos de mineração em aterros como alternativa às barragens de rejeito, a partir de um estudo de caso de disposição de um depósito de resíduos de bauxita, localizado no estado do Pará, no Brasil. O resíduo de bauxita é gerado após a obtenção do produto final a alumina, pelo processo Bayer, processo hidrometalúrgico no qual a bauxita é submetida para a produção da alumina, gerando uma grande quantidade de resíduo que precisa ser disposto de forma, estável e ambientalmente correta.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram coletadas informações e resultados referentes aos testes de filtragem no resíduo de bauxita e dos testes de compactação no resíduo realizados na pista teste. Nesse sentido, o desenvolvimento do trabalho se deu nas seguintes etapas: revisão bibliográfica, coleta de dados sobre o resíduo do filtro tambor e do filtro prensa para fazer uma comparação dos teores de sólidos e seus ganhos; verificação das principais vantagens e desvantagens, entre os sistemas de filtragem e os métodos de disposição através de dados coletados das verificações da pista teste com resíduo filtrado; e análise qualitativamente, pelo método FMEA (Failure Modes and Effect Analysis), de um sistema de disposição com rejeito desaguado por filtro tambor, para apoiar em tomada de decisão de um novo sistema de filtragem de rejeitos com filtros prensa e sua viabilidade para disposição em aterros controlados.

A Figura 25 apresenta as etapas seguidas para o desenvolvimento da pesquisa do trabalho e todas as etapas serão descritas nos tópicos a seguir.

Figura 5 - Fluxo de Pesquisa.



Fonte: Autor 2023.

### 3.1 COLETA DE DADOS SOBRE O RESÍDUO DO FILTRO TAMBOR E FILTRO PRENSA

Os dados do filtro tambor foram obtidos de especificação existente de projetos de disposição e armazenamento do resíduo de bauxita e de ensaios de laboratório e de campo no resíduo do filtro tambor, suas principais características, tais como: teor de sólidos, umidade, ângulo de repouso, densidade. Já os dados do resíduo do filtro prensa foram obtidos em testes pilotos, dentre os quais destacam-se principalmente o teor de sólidos e a umidade, parâmetros essenciais que caracterizam os resíduos quanto seu comportamento geotécnico e geomecânico.

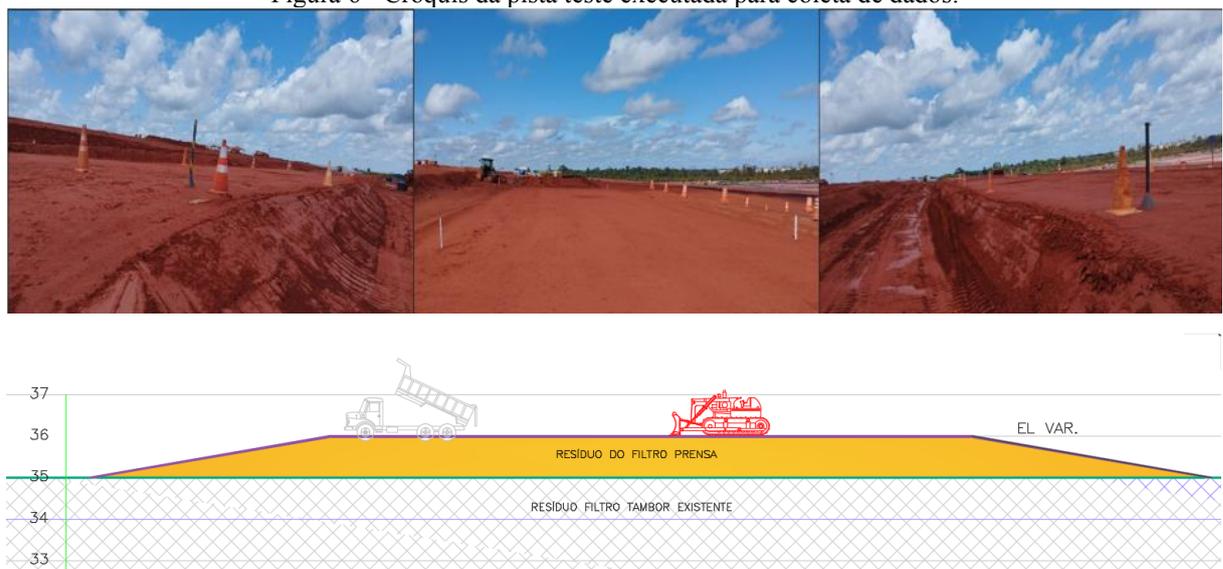
### 3.2 COMPARAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS DO FILTRO TAMBOR E DO FILTRO PRENSA

Para a comparação dos teores de sólidos entre os filtros, foram utilizados os valores existentes de especificação e dados operacionais de performance dos filtros de tambor. Para o filtro prensa, valores encontrados em testes de filtração serviram de parâmetros para comparação, sendo os principais o teor de sólidos e a umidade do resíduo de bauxita após seu desaguamento.

### 3.3 PISTA TESTE

Testes pilotos de filtração foram realizados visando confirmar o teor de sólidos e umidade após o desaguamento por filtro prensa e o resíduo resultante serviu para realização de uma pista teste que teve como objetivo simular as condições de compactação do resíduo a ser depositado no novo sistema de armazenamento de resíduo, coletar amostras indeformadas (blocos) e deformadas para realização de ensaios de laboratório e obter parâmetros a serem comparados com os parâmetros obtidos de amostras moldadas no laboratório com resíduo de filtro prensa, em diferentes condições de grau de compactação e umidade e também verificar o comportamento geotécnico do resíduo, comportamento geomecânico e trabalhabilidade. A Figura 26 apresenta o perfil da pista teste.

Figura 6 - Croquis da pista teste executada para coleta de dados.



Fonte: Autor 2023.

### 3.4 COLETA DE DADOS DA PISTA TESTE

Foram coletadas amostras para realização de ensaios de campo e de laboratório no resíduo compactado, os resultados encontrados de grau de compactação, umidade, teor de sólidos e caracterização, forneceram dados que serviram para avaliar o comportamento do resíduo desaguado por filtro prensa e sua eficácia quando disposto em forma de aterro controlado, também foram analisados dados de um estudo do resíduo do filtro tambor depositado.

### 3.5 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA

Com dados de estudos realizados no resíduo do filtro tambor depositado, foi realizada a comparação dos métodos de disposição levando em consideração os parâmetros resultados de grau de compactação, umidade e densidades encontrados na pista teste com resíduo do filtro prensa, alguns aspectos de ordem operacional, ambiental e estrutural (Risco de acidentes durante a carga, transporte e descarga do resíduo; custo de manutenção dos caminhões; dificuldade de controle do fluxo do resíduo dentro do depósito; Grandes áreas expostas por muito tempo, gerando emissão de particulados (poeira), até que se tenham condições para fechamento; acúmulo de água de chuva dentro do depósito; risco de galgamento dos diques), foram elencados e nortearam a comparação em termos de eficiência e melhor prática de engenharia, sendo bastante relevante as diferenças dos métodos e do comportamento dos materiais. A figura 27, apresenta os materiais resultantes da filtragem por filtro tambor e filtro prensa.

Figura 27 - Comparação entre os resíduos de disposição úmida e seca.



Fonte: Autor 2023.

### 3.6 ANÁLISE DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS FILTROS E DOS RESPECTIVOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA.

Para as análises foram feitas observações do processo operacional com resíduo do filtro tambor e sua forma de transporte, disposição, qualidade do filtrado, seus riscos operacionais relacionados a saúde e segurança, seus impactos ambientais e seus riscos estruturais quanto a estabilidade. No capítulo de resultados as vantagens e desvantagens relacionadas aos aspectos operacionais e aos aspectos de saúde segurança e meio ambiente são apresentados.

### 3.7 ANÁLISE DE RISCO QUALITATIVA PELO MÉTODO FMEA

O presente estudo teve como finalidade a identificação dos riscos geotécnicos, associados ao avanço da plataforma de disposição de resíduos filtrados por filtro tambor, para diferentes alternativas, empregando a metodologia FMEA - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. Foram consideradas 03 alternativas de avanço da plataforma para disposição de resíduo. Uma vez definida a estrutura, seus componentes e os modos de falhas potencialmente credíveis, inicia-se a etapa de análise dos riscos. Esta metodologia permite a identificação e compreensão dos possíveis modos de falha de um sistema e seus efeitos. Constitui ainda uma ferramenta para classificação dos riscos de forma qualitativa, apoiando no desenvolvimento e priorização de ações de resposta aos riscos e para apoiar em tomada de decisão de um novo sistema de filtragem de rejeitos com filtros prensa e sua viabilidade para disposição em aterros controlados.

### 3.8 DEFINIÇÃO DOS GATILHOS E MODOS DE FALHA

- Foram consideradas 03 alternativas de avanço da plataforma;
- As análises tiveram como foco principal os modos de falha relacionados aos aspectos geotécnicos e hidrológicos / hidráulicos;
- Os aspectos geotécnicos estão associados ao potencial modo de falha "instabilização da plataforma";
- Os aspectos hidrológicos/hidráulicos estão associados ao potencial modo de falha de galgamento dos diques de contorno;
- A avaliação das consequências contemplou o efeito FINAL da falha;
- As consequências / efeitos foram avaliados qualitativamente considerando isoladamente 4 esferas: (1) Impacto no meio biótico e uso do solo, (2) Órgãos reguladores e censura;

(3) Inquietação pública e perda de imagem e (4) Saúde e segurança, conforme métricas propostas por Robertson, A. e Shaw, S. (Risk Management for Major Geotechnical Structures of Mines).

### 3.9 PREMISSAS ADOTADAS NA PESQUISA

As premissas adotadas para análise das eficácias dos filtros tanto de tambor quanto prensa, foram as seguintes conforme parágrafos a, b, e c.

- a) Realização de testes de filtragem e três diferentes fornecedores de filtro prensa, para verificação de desempenho e eficácia no desaguamento do resíduo de bauxita quanto ao teor de sólidos alcançado,  $T.S \geq 78\%$  (Figura 28). Uma concentração de sólidos da lama vermelha descartada de pelo menos 78 % foi estabelecida como referência, os filtros convencionais de tambor atingem uma concentração de sólidos de cerca de 64%, e os resultados de teores de sólidos de três filtros foram satisfatórios após a filtração, atingindo valores superiores ao estabelecido. Após os testes, obteve-se uma pequena quantidade de resíduo, o qual foi estocado e posteriormente submetido a testes em uma pista experimental.

Figura 7- Resíduo de bauxita filtrado por filtro prensa com 78% de teor de sólidos.



Fonte: Alunorte 2023.

- b) Realização de testes em uma pista experimental visando sua disposição em forma de aterro controlado e realizar uma comparação dos parâmetros e suas principais vantagens e desvantagens em relação ao método até então praticado, filtro tambor. Consistiu em realizar os testes iniciais com o resíduo resultante dos testes pilotos, cerca de 16 toneladas ( $9m^3$ ) que se encontravam em “bags” foram içados por caminhão munck e empilhados na área definida para os testes. A área para o teste foi o depósito de resíduos

sólidos 1, com dimensões de 5,0 m de largura x 20,0 m de comprimento e 2% de inclinação. Para a execução dos serviços, equipamentos mecânicos foram utilizados a saber:

- Trator de esteira D6;
- Carregadeira;
- Caminhão pipa;
- Caminhão basculante;
- Escavadeira.

Outros equipamentos e materiais:

- Laboratório de solos.

A disposição do resíduo seguiu ciclos de lançamento, espalhamento e compactação, a fim de simular o processo a ser empregado no novo sistema. Conforme apresenta a Figura 29.

Figura 8 - Processo construtivo da pista experimental com resíduo compactado.



Fonte:Autor, 2023.

Lançamento/Aterro:

- 1º. Verificação teor de sólidos previsto nos estudos;
- 2º. Utilização de um caminhão munck para construir uma pilha com o resíduo do filtro prensa;
- 3º. Observação do comportamento do resíduo sob ação de água;
- 4º. Coletou-se amostras para verificar o teor de sólidos posterior ao lançamento e compactação;

Espalhamento/Compactação com Trator de Esteira:

- 5º. Utilizando o trator de esteira D6, o material foi espalhado com camada de cerca de 0,50 m de espessura;

- 6°. O equipamento empregado no espalhamento (D6) promoveu o processo de compactação;
- 7°. Após 2 passadas com o D6, foram executados ensaios para verificação da umidade e densidade (utilizar método “hiltf”);
- 8°. Após 4 passadas com o D6, foram executados ensaios para verificação da umidade e densidade (utilizar método “hiltf”).

Foram executados os seguintes ensaios, ilustrados na Figura 30:

- Teor de sólidos do resíduo antes de iniciar os trabalhos;
- Teor de sólidos após o processo de umedecimento da lama;
- Teor de sólidos após os processos de compactação da camada;
- Determinação da umidade e densidade in situ (Hiltf) após os processos de compactação de todas as camadas;
- Ensaios de compactação do resíduo - Proctor Normal;
- Ensaios de caracterização – granulometria, LL e LP.

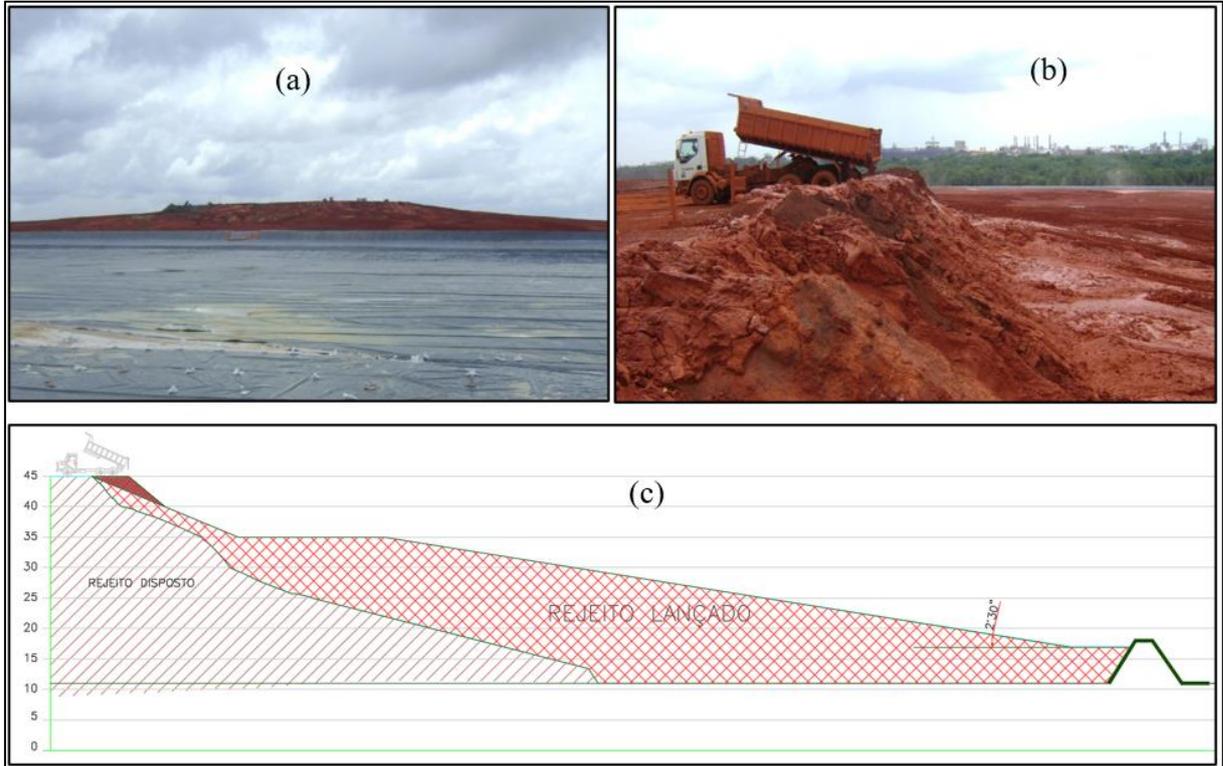
Figura 30 - Execução de testes na pista experimental e ensaios geotécnicos.



Fonte: Autor, 2023.

- c) Realização de uma análise de risco tipo FMEA no método do filtro tambor (Figura 31) e a maneira de disposição com avanço de plataforma para identificação dos riscos e auxiliar na escolha e definição de um novo sistema de disposição de resíduos de bauxita.

Figura 31 - Plataforma de lançamento de resíduo do filtro tambor: a) Vista da plataforma de lançamento b) Caminhão basculando resíduo com T.S ~60%; c) Detalhe de avanço da plataforma.

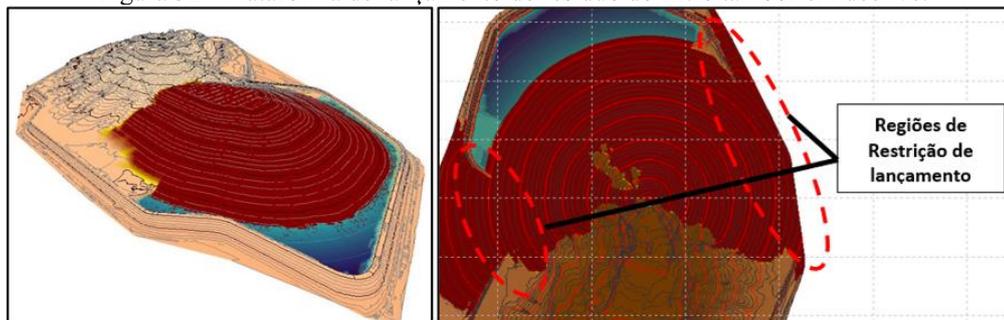


Fonte: Autor 2023.

### 3.9.1 Descrição das três alternativas consideradas no avanço de execução das plataformas

- (a) Continuidade do avanço gradativo da plataforma em declive, da El. 60 m até a El. 43 m (Situação de operação de disposição de rejeitos); conforme Figura 32.

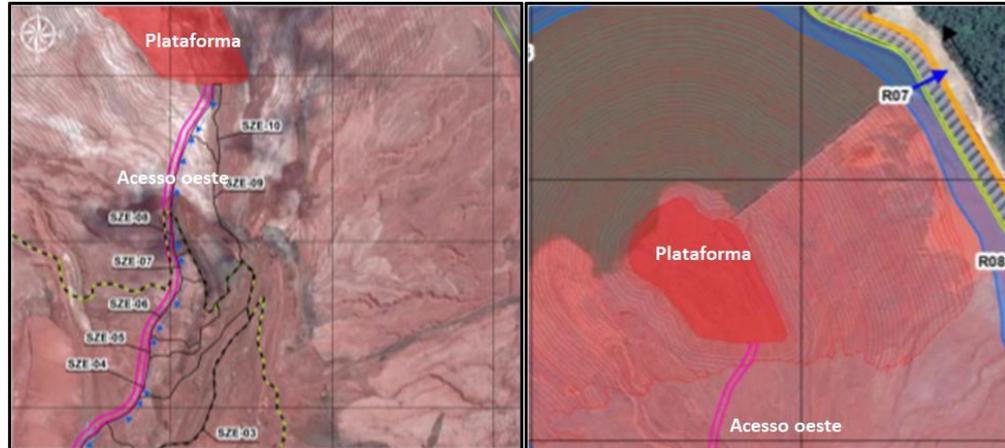
Figura 32 - Plataforma de lançamento de resíduo do filtro tambor em declive.



Fonte: Autor 2023.

- (b) Construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, na porção oeste do depósito, com traçado em posição inferior, aproximadamente em curva de nível conforme Figura 33.

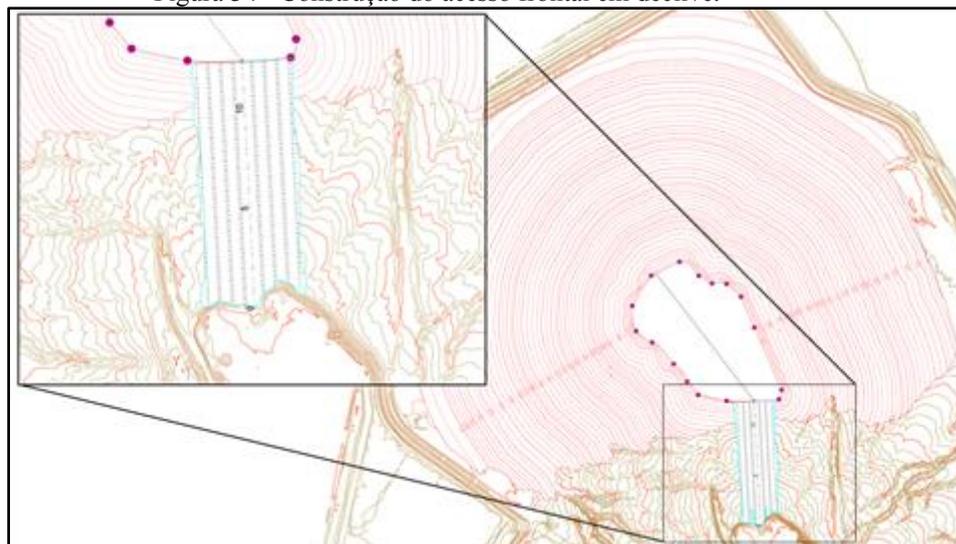
Figura 33 - Acesso operacional oeste para a plataforma.



Fonte: Autor 2023

- (c) Construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, com traçado frontal e em declive, partindo da elevação da plataforma na ( $\approx$  El. 60 m) até a El. 43 m. Ver Figura 34.

Figura 34 - Construção do acesso frontal em declive.



Fonte: Autor 2023

- 1 - As análises tiveram como foco principal os modos de falha relacionados aos aspectos geotécnicos e hidrológicos / hidráulicos.

- 2 - Os aspectos geotécnicos estão associados ao potencial modo de falha "instabilização da plataforma".
- 3 - Os aspectos hidrológicos/hidráulicos estão associados ao potencial modo de falha de galgamento dos diques de contorno.
- 4 - A avaliação das consequências contemplou o efeito FINAL da falha.
- 5 - As consequências / efeitos foram avaliados qualitativamente considerando isoladamente 4 esferas: (1) Impacto no meio biótico e uso do solo, (2) Órgãos reguladores e censura; (3) Inquietação pública e perda de imagem e (4) Saúde e segurança, conforme métricas propostas por Robertson, A. e Shaw, S. (Risk Management for Major Geotechnical Structures of Mines), como apresentado nas Tabela 4 e 5.
- 6 - Para a presente análise foi considerado o atendimento, por parte das equipes operacionais, a um PRO (procedimento operacional) elaborado para o avanço da plataforma.

Tabela 2 - Métricas para avaliação qualitativa da possibilidade do evento e severidade dos efeitos.

TABELA 1 - MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA POSSIBILIDADE DO EVENTO E SEVERIDADE DOS EFEITOS							
Segundo Robertson, A. e Shaw, S. (Risk Management for Major Geotechnical Structures of Mines)							
SEVERIDADE DE EFEITOS					POSSIBILIDADE DO EVENTO		
Severidade das Consequências	Impacto: Meio Biótico e Uso do Solo	Impactos Sobre Órgãos Reguladores e Censura	Inquietação Pública e Perda de Imagem	Saúde e Segurança	Possibilidade	Consequências na Segurança	
						Consequências nos Interesses Ambientais e Públicos	
<b>EXTREMA (E)</b> (>US10 M)	Impacto catastrófico sobre o habitat (grande e irreversível)	Incapacidade total de atender às exigências regulatórias. Paralisação ou restrição severa de operação	Grande manifestação de ONGs locais e internacionais com grande perda de valor de mercado	Numerosas mortes esperadas	<b>IMPROVÁVEL (I)</b>	Possibilidade de Ocorrência < 0.01%	Possibilidade de Ocorrência < 0.1%
<b>ALTA (A)</b> (US1 - US10 M)	Impacto significativo, irreversível sobre o habitat ou grande reversível	Incapacidade regular (mais de 1 vez por ano) ou falha severa em atender às exigências regulatórias. Multas crescentes e grandes. Perda da confiança dos reguladores	Ativismos de ONGs locais e internacionais resultando em impacto político e financeiro e sobre a liberdade de negócios da companhia	Ferimentos graves ou provável incapacitação. Algum potencial de mortes	<b>BAIXA (B)</b>	Possibilidade de Ocorrência de 0.01 a 0.1%	Possibilidade de Ocorrência de 0.1 a 1%
<b>MODERADA (M)</b> (US0.1 - US1 M)	Impacto significativo, reversível sobre o habitat	Incapacidade ocasional (menos de 1 vez por ano) ou falha moderada em atender às exigências regulatórias. Expectativas de multas ou censuras	Atenção ocasional de ONGs requerendo pequenas mudanças de procedimentos e maior intensidade de ações de relações públicas e comunicação	Perda de tempo ou prováveis ferimentos. Algum potencial para ferimentos graves. Pequeno risco de mortes	<b>MODERADA (M)</b>	Possibilidade de Ocorrência de 0.1 - 1%	Possibilidade de Ocorrência de 1 a 10%
<b>BAIXA (B)</b> (US0.01 - US0.1 M)	Impacto pequeno sobre o habitat	Deixa de atender às exigências ou expectativas regulatórias. Alguma perda de tolerância dos agentes reguladores. Maior frequência de fiscalização.	Manifestações pouco frequentes de ONGs atendidas por ações de relações públicas e comunicação	Pequenos socorros requeridos. Pequeno risco de ferimentos graves	<b>ALTA (A)</b>	Possibilidade de Ocorrência de 1 - 10%	Possibilidade de Ocorrência de 10 a 50%
<b>DESPREZÍVEL (D)</b> (<US0.01 M)	Impacto não mensurável	Impacto não mensurável	Nenhuma atenção de ONGs locais ou internacionais	Não mensurável	<b>ESPERADA (E)</b>	Possibilidade de Ocorrência > 10%	Possibilidade de Ocorrência > 50%
MUDANÇAS NO RISCO							
<b>MELHORA SUBSTÂNCIAL (SI)</b>					O nível de risco melhorou (diminuiu) sensivelmente em relação à análise anterior.		
<b>MELHORA (I)</b>					O nível de risco melhorou (diminuiu) em relação à análise anterior.		
<b>SEM MUDANÇAS (N)</b>					Não houve alterações no nível de risco em relação à análise anterior.		
<b>PIORA (W)</b>					O nível de risco piorou (aumentou) em relação à análise anterior.		
<b>PIORA SUBSTANCIAL (SW)</b>					O nível de risco piorou (aumentou) sensivelmente em relação à análise anterior.		

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 3- Planilha de análise FMEA.

ANÁLISE DE RISCO FMEA											
ESTRUTURA	IDENTIFICAÇÃO	COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA	EFEITOS/ CONSEQUÊNCIAS	ESTAGIO DO PROJETO	CONSEQUÊNCIAS				AÇÕES MITIGADORAS/ COMENTÁRIOS
							POSSIBILIDADE	MEIO BIÓTICO E USO DO SOLO	ÓRGÃOS REGULADORES	INQUIETAÇÃO PÚBLICA E PERDA DE IMAGEM	

Fonte:Autor, 2023.

As duas classificações, possibilidade e consequências, são levadas a uma matriz, denominada matriz de riscos, que ilustra gráfica e cromaticamente as classes de risco (Figura 35). A partir desta matriz, é estabelecida uma classificação de riscos de acordo com uma escala, variando da Classe 1 à Classe 5, que se encontram descritas a seguir.

Figura 35 - Matriz de risco FMEA proposta por Robertson & Shaw (2003).

		POSSIBILIDADE				
		IMPROVÁVEL (I)	BAIXO (B)	MODERADO (M)	ALTO (A)	ESPERADO (E)
CONSEQUÊNCIA	EXTREMO (E)	3	3	4	4	5
	ALTO (A)	2	3	3	4	4
	MODERADO (M)	2	2	3	3	4
	BAIXO (B)	1	2	2	3	3
	DESPREZÍVEL (D)	1	1	2	2	3

Fonte: Robertson e Shaw, 2003.

## CLASSE 1 – RISCO MUITO BAIXO

### Critério Geral:

- Ocorrência do modo de falha tem apenas pequeno impacto;
- Projeto, construção e operação são apropriados e de alto padrão;
- São requeridos apenas cuidados e gestão normal para manter o risco baixo.

**Gestão do Risco:** Este é o mais baixo nível de risco. A gestão do risco é, primordialmente, para manter este nível.

## CLASSE 2 – RISCO BAIXO

### Critério Geral:

- Ocorrência do modo de falha resultaria apenas em impactos pequenos a moderados e mitigáveis;
- Projeto, construção e operação têm deficiências menores, que são corrigíveis;
- Alguma gestão crescente de risco é requerida durante o período de correção.

**Gestão de Risco:** A redução para a Classe 1 é desejável e deve ser implementada como parte da otimização de um projeto em andamento.

## CLASSE 3 – RISCO MÉDIO (OU MODERADO)

### Critério Geral:

- Ocorrência do modo de falha resultaria apenas em impactos moderados;
- O projeto, construção e operação têm deficiências moderadas que são corrigíveis com gestão direta;
- O compromisso de gestão de risco é requerido durante o período de correção.

**Gestão de Risco:** A implementação contínua do projeto, construção ou operação deve ser procedida sob um plano específico de gestão de riscos, que assegure que os riscos possam ser administrados em um nível baixo, enquanto as medidas corretivas são implementadas.

## CLASSE 4 – RISCO ALTO

### Critério Geral:

- Ocorrência do modo de falha pode resultar em impactos severos;

- Deficiências de projeto, construção e operação são grandes, mas corrigíveis com gestão direta;
- Gestão de riscos comprometida e bem estudada é requerida durante o período de correção. A correção é urgente, mas o nível de crise ainda não está caracterizado.

**Gestão de Risco:** Implementação contínua de projetos, construção ou operação deve ser procedida com um plano específico de gestão de riscos. Não é possível reduzir os riscos a níveis baixos enquanto as correções não são realizadas.

#### CLASSE 5 – RISCO EXTREMO

Critério Geral:

- Ocorrência do modo de falha pode resultar em impactos graves;
- As deficiências são grandes;
- É necessário um alto nível de gestão de risco durante o período de correção;
- Correção é necessária com urgência, possivelmente já em nível de crise.

**Gestão de Risco:** Implementação contínua de projetos, construção ou operação deve ser procedida de um plano específico de gestão de riscos. Não é possível reduzir os riscos a níveis baixos enquanto as correções não são realizadas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste item são apresentados com base nos resultados dos testes de filtragem e testes na pista experimental, uma comparação das características de cada sistema de filtragem referente a parâmetros principais, suas vantagens e desvantagens relativas ao desaguamento e disposição por filtro tambor e filtro prensa e análise de risco referente a aplicação do método FMEA, proposto por Robertson & Shaw (2003), para o método de disposição com o resíduo do filtro tambor.

Aqui é apresentado um estudo de caso realizado por uma refinaria de bauxita para implantação de um novo sistema de filtração de rejeito (Lama), duas alternativas foram estudadas, considerando alternativa 1 filtração com filtro tambor (Convencional) e alternativa 2 filtração com filtro prensa vertical, a Figura 36 e Figura 37 apresentam o comparativo de implantação do sistema em termos de taxa de ocupação de volume e área, pois devido o filtro tambor apresentar teor de sólidos de 60% a 64%, se limita a formação de uma “pilha” com ângulo de repouso de 2,5°, enquanto que o rejeito filtrado pelo filtro prensa oferece um teor de sólidos de até 80%, o que se possibilita a formação de aterro e ou pilhas com ângulos de mais de 20°, resultando em um volume maior em relação a mesma área de ocupação para o rejeito do filtro tambor.

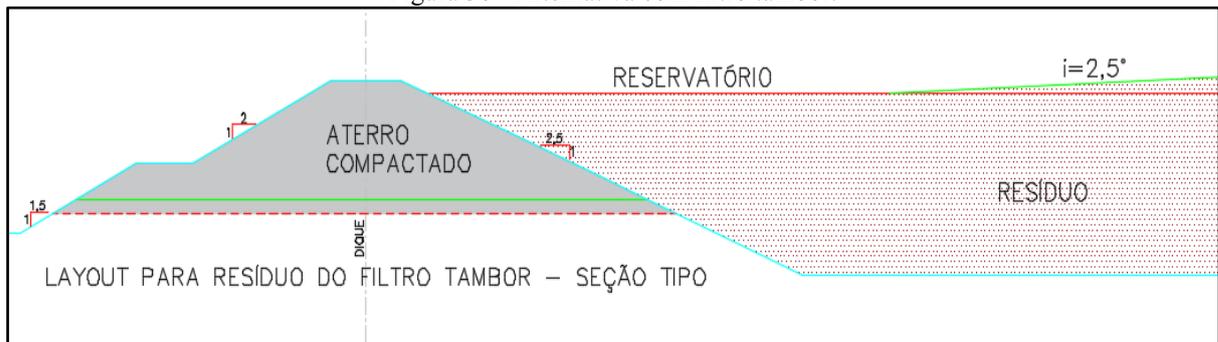
Os estudos apresentados são motivados pelo fato do resíduo do filtro prensa (FPr) proporcionar vantagens em comparação ao resíduo do filtro tambor (FTa), dentre as quais destacam-se:

- Maior ângulo da pilha de deposição; Devido a produção de um resíduo seco, é permitida sua compactação, e sua disposição pode formar pilhas bastantes ígremes, e consequentemente maior volume disponível nos depósitos, em função dos maiores ângulos de deposição;
- Maior volume depositado para uma mesma massa de resíduo gerado; Através da filtração por filtro prensa, ocorre a redução do volume do resíduo gerado na base úmida, ocorre uma desidratação do resíduo e na disposição essa redução aumenta com a compactação do resíduo seco, diminuindo ainda mais o volume de vazios.
- Maior capacidade de deposição de resíduo em uma mesma área – relação massa de resíduo depositado/área; Através da compactação do resíduo, tem-se o aumento da densidade, da coesão e do ângulo de atrito, proporcionando aterros ígremes em forma

de pilhas compactadas, e assim um maior armazenamento de resíduo em uma fração menor de área.

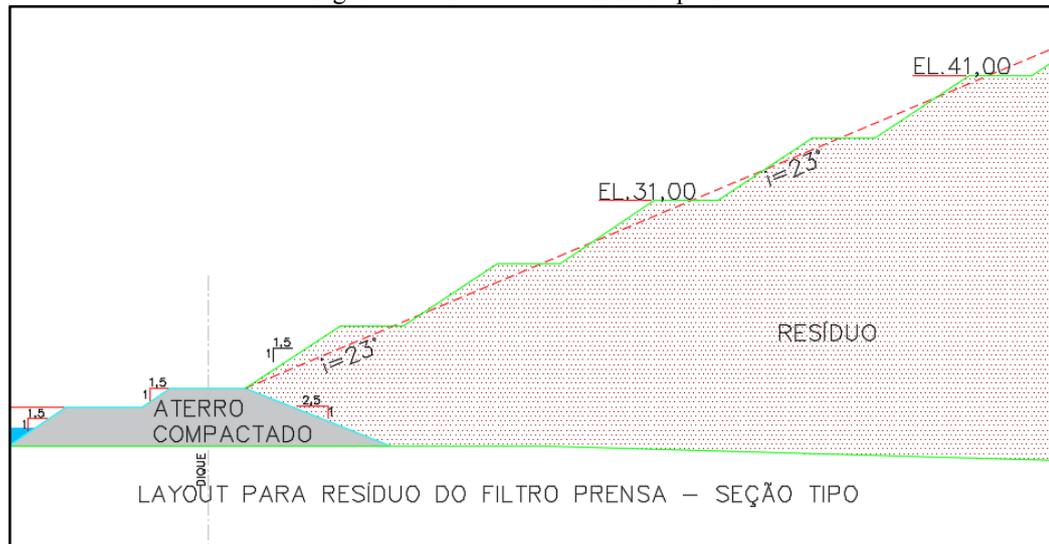
- Menor quantidade de água presente no depósito; Maior segurança do sistema devido a não se ter armazenamento de água dentro do reservatório;
- Maior segurança do depósito; Maior segurança do sistema devido a não se ter armazenamento de água dentro do reservatório e a disposição de resíduo controlada através da compactação e redução de riscos de rupturas;
- Menor potencial de dano ambiental; Menor potencial de dano ambiental no caso de ruptura devido ao resíduo seco.
- Menor impacto ambiental; Menores áreas para construção dos depósitos, reduzindo a necessidade de supressão vegetal de grandes áreas, menor consumo de carbono com a redução de caminhões na operação devido a possibilidade do transporte por correias e redução da pegada ambiental, menor teor de soda cáustica no resíduo a ser disposto, consequentemente representando um menor risco de contaminação do solo.
- Maior facilidade para o fechamento do depósito: Possibilidade de fechamento progressivo da área, o que resulta em diminuição da emissão de particulado (poeira) e antecipando a integração da área ao meio ambiente;

Figura 36 - Alternativa com filtro tambor.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 37 - Alternativa com filtro prensa.



Fonte: Autor, 2023.

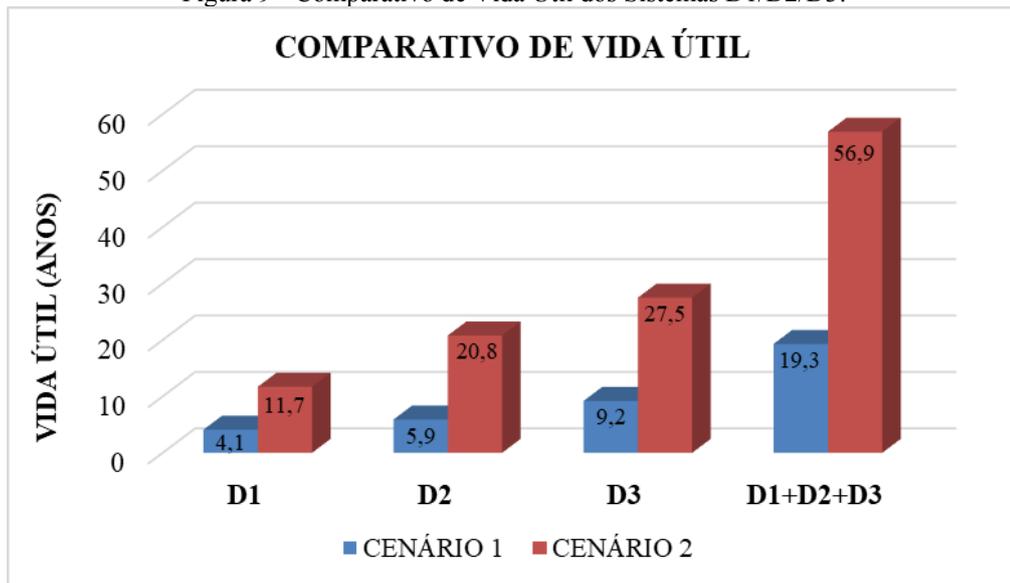
As alternativas estudadas para concepção dos depósitos de resíduos forneceram dados importantes para comparação de viabilidade técnica e econômica. Aqui é apresentado o resultado dos estudos comparativos de estabilidade, D1 quando operava com disposição de resíduo do filtro tambor, D1 operando com uma camada de resíduo do filtro prensa sobre o resíduo do filtro tambor e D2 operando totalmente com disposição de resíduo do filtro prensa e também a vida útil dos depósitos de resíduos, D1 em operação e D2 e D3 como as alternativas novas de expansão, considerando a utilização de filtro tambor cenário 1 e filtro prensa cenário 2 para o desaguamento do resíduo. A Figura 38 ilustra a comparação da vida útil dos sistemas D1, D2 e D3, com deposição de resíduo de filtro tambor (Cenário 1) e filtro prensa (Cenário 2). A Figura 39 sintetiza a relação da massa de resíduo (base seca)/ha, no D1, D2 e D3, considerando a disposição de resíduos filtro tambor e filtro prensa.

D1 - Depósito que operava com filtro tambor e teve a vida útil prolongada com reconformação com disposição de resíduo do filtro prensa;

D2 - Depósito novo projetado para operar com nova tecnologia de desaguamento por filtro prensa;

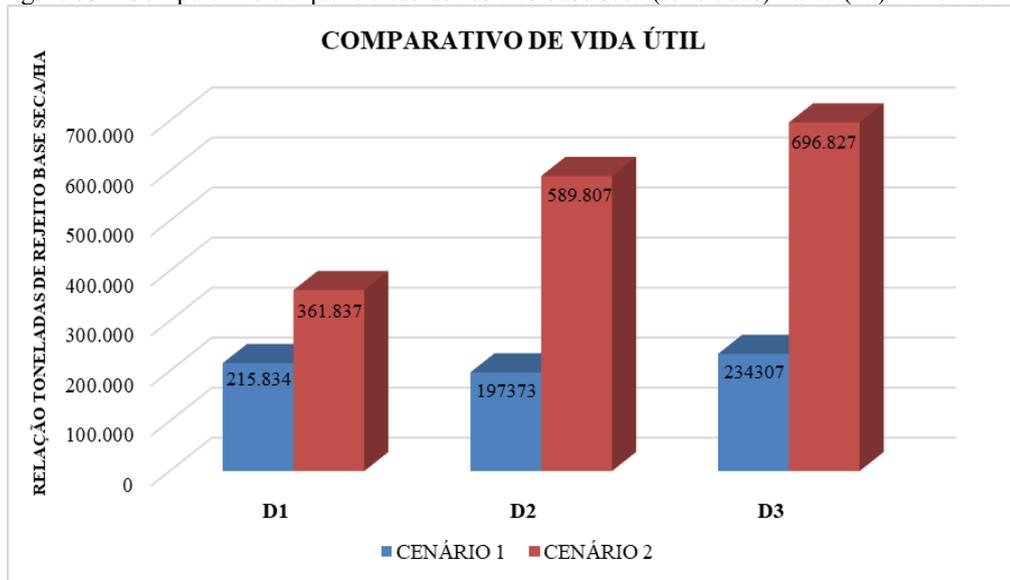
D3 - Depósito novo projetado para operar com nova tecnologia de desaguamento por filtro prensa após fim de vida útil do D2.

Figura 9 - Comparativo de Vida Útil dos Sistemas D1/D2/D3.



Fonte: Autor, 2023

Figura 39 - Comparativo de quantidade de resíduo base seca (toneladas) / área (ha) - D1/D2/D3.



Fonte: Autor, 2023.

## 4.2 RESULTADOS DA PISTA DE TESTE COM RESÍDUO DO FILTRO PRENSA

### 4.2.1 Ensaios de Compactação Proctor Normal

A Tabela 6 apresenta os resultados de compactação e os respectivos teores de sólidos encontrados. Na Tabela 7 são apresentados os resultados dos testes pilotos com filtro prensa no resíduo de bauxita. Pelos resultados verificou-se que os valores de teores de sólidos se

aproximam dos valores dos testes de filtração com filtro prensa, e demonstram uma correlação com o valor de umidade e densidade na compactação.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de compactação.

<b>Amostra</b>	<b><math>\gamma_d</math> max (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>W<sub>ótima</sub> (%)</b>	<b>TS (%)</b>
AM-01	1,46	27,30%	78,55%
AM-02	1,53	26,60%	78,99%
AM-03	1,55	27,60%	78,37%
AM-04	1,47	28,10%	78,06%
AM-05	1,47	26,90%	78,80%
AM-06	1,55	27,00%	78,74%
AM-07	1,54	27,40%	78,49%
AM-08	1,54	27,60%	78,37%
Média	1,51	27,31%	78,55%

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5 - Resultado dos testes pilotos com Filtro Prensa (2010).

<b>Nº Teste</b>	<b>PRODUTO</b>	
	<b>Umidade (%)</b>	<b>Teor Sólidos (%)</b>
1	21,9	78,1
2	23,0	77,0
3	19,1	80,9
4	20,7	79,3
5	20,1	79,9
6	18,3	81,7
7	19,6	80,4
8	19,6	80,4
9	20,2	79,8
10	21,1	78,9
11	20,4	79,6

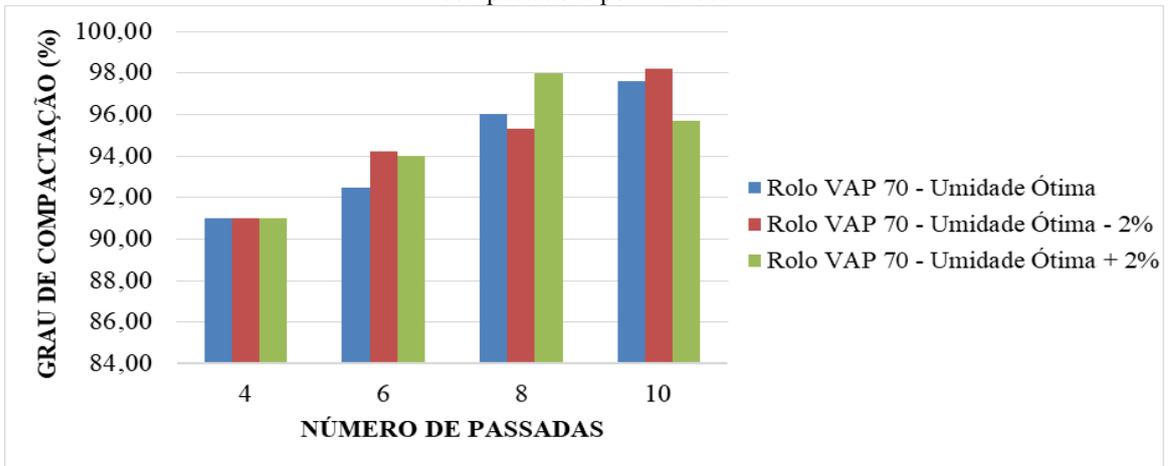
Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.2 Ensaio de Campo

O resumo dos resultados obtidos nos ensaios de campo é apresentado a seguir, por meio de gráficos que indicam o comportamento do grau de compactação e da densidade seca do resíduo em função do número de passadas para rolo compactador e trator de esteiras, para diferentes valores de variação de umidade simuladas.

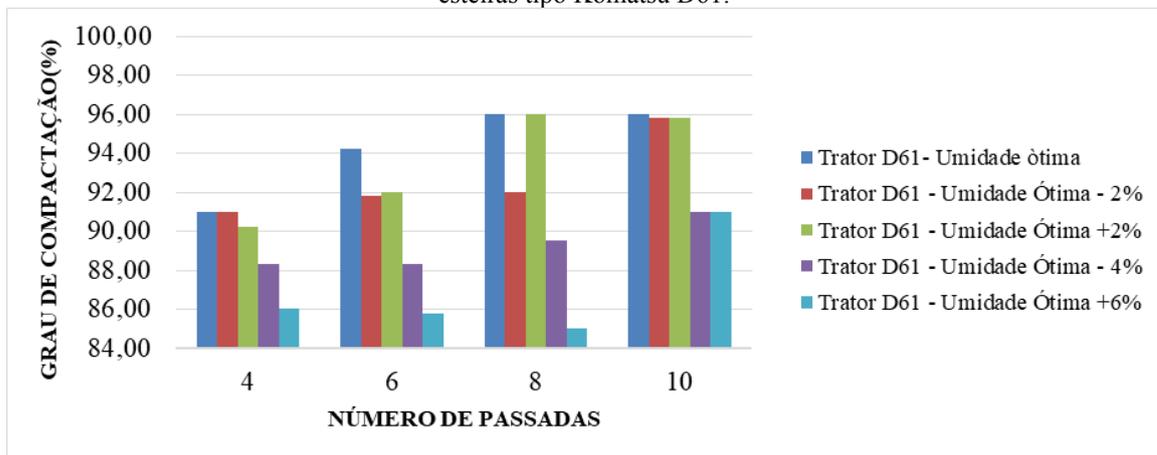
A diferença de valores encontrados nos estudos comparados, apresentados nos gráficos das Figuras 40, 41, 42 e 43 está relacionada com a qualidade de compactação de cada pista teste e diferentes metodologias de compactação, diferenciando o número de passadas e o tipo de maquinário para compactação de cada camada.

Figura 10- Variação do grau de compactação com o número de passadas para os testes realizados com rolo compactador tipo VAP 70.



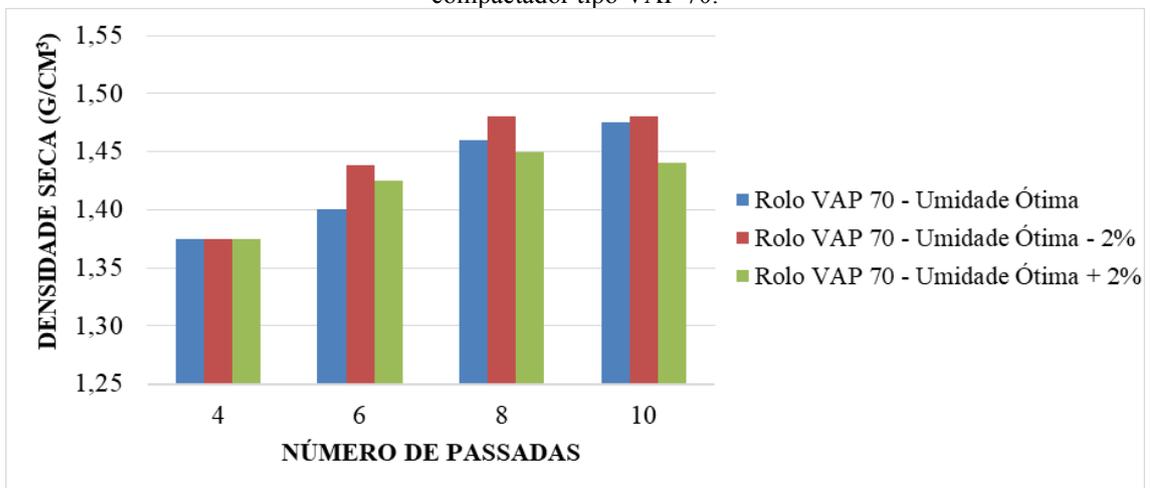
Fonte: Autor, 2023.

Figura 41 - Variação do grau de compactação com o número de passadas para os testes realizados com trator de esteiras tipo Komatsu D61.



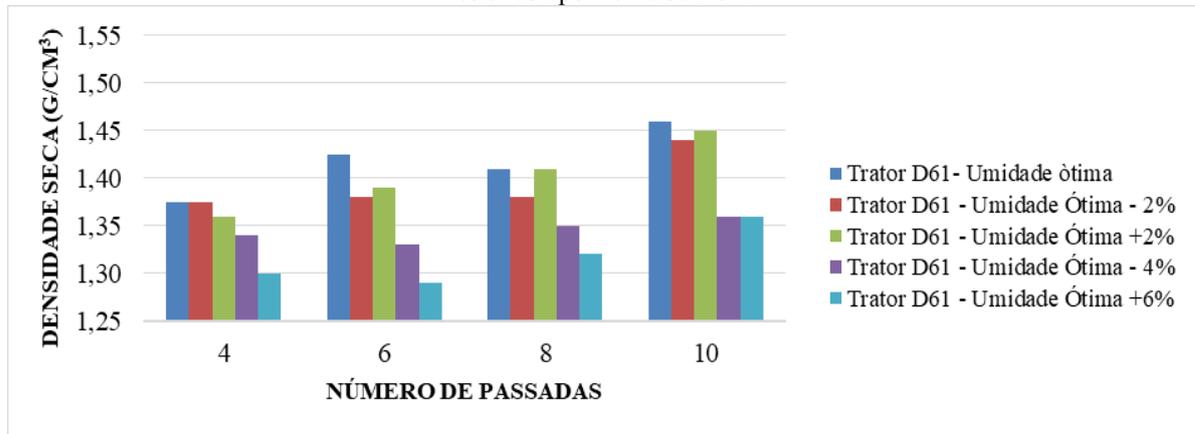
Fonte: Autor, 2023.

Figura 42 - Variação da densidade seca com o número de passadas para os testes realizados com rolo compactador tipo VAP 70.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 43 - Variação da densidade seca com o número de passadas para os testes realizados com trator de esteiras tipo Komatsu D61.



Fonte: Autor, 2023.

Com base na geometria estudada para os dois tipos de sistema de filtragem, filtro tambor e filtro prensa horizontal, foi possível obter a estimativa de custos para a implantação de um sistema de rejeitos com disposição após desaguoamento por filtro tambor e por filtro prensa, o que demonstrou a vantagem em investir em um novo sistema de disposição com filtros prensa como sistema de filtração. Para obtenção de dados foram realizados testes pilotos de filtração e aterros testes com rejeito de bauxita filtrado, os quais forneceram parâmetros que nortearam as verificações. Foram estudados parâmetros geotécnicos como: Coesão, ângulo de atrito, grau de compactação, inclinação de pilha. A Tabela 8 apresenta um comparativo entre as principais características do rejeito filtrado pelos filtro tambor e filtro prensa. A Figura 39 apresenta uma comparação entre o filtro de tambor e o filtro de prensa de investimentos anuais e cumulativos no decorrer dos anos de operação do sistema.

Tabela 6 - Comparação entre as características de resíduo desaguado por filtro tambor e resíduo desaguado por filtro prensa.

Descrição do parâmetro	Filtros Tambor	Filtros Prensa
Teor de sólidos do resíduo	55 – 65%	70 – 78 %
Ângulo final do depósito	2,5°	19° a 23°
Densidade seca do resíduo depositado	0,85 a 1,15 t/m <sup>3</sup>	1,30 a 1,35 t/m <sup>3</sup>
Elevação final da pilha	55 metros	80 metros
Teor cáustico do resíduo	10 - 13 g/l	6 – 18 g/l
Necessidade de água para lavagem	1.0 t H <sub>2</sub> O/ t lama seca	0.4 – 1.3 H <sub>2</sub> O/ t lama seca

Figura 44 - Comparação entre o filtro de tambor e o filtro de prensa investimentos anuais e cumulativos.



Fonte: Autor, 2023.

Análise comparativa dos métodos de disposição (Filtro Tambor-Dry stacking e Filtro Prensa-Dry cake disposal). Aqui será abordado um comparativo levando em consideração os aspectos operacionais, os aspectos de saúde, os aspectos de segurança e os aspectos de meio ambiente, que também fazem parte da avaliação dos sistemas de filtração e seus respectivos métodos de disposição.

### 4.3 ASPECTOS OPERACIONAIS

A Quadro 1 apresenta as vantagens e desvantagens da operação do sistema de disposição com resíduo do Filtro Tambor e com resíduo do Filtro Prensa.

Quadro 1 – Aspectos operacionais: Filtro Tambor versus Filtro Prensa.

<b>ASPECTOS OPERACIONAIS</b>		
	<b>FILTRO TAMBOR</b>	<b>FILTRO PRENSA</b>
<b>VANTAGENS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuação da operação conforme já é executado convencionalmente, do qual já se tem prática e conhecimento dos fatores de risco envolvidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução significativa do tráfego de caminhões na estrada de acesso do DRS, o que diminui o risco de acidentes;</li> <li>• Menor quantidade de água dentro do depósito, o que contribui para a estabilidade geotécnica do depósito;</li> <li>• Aumento da capacidade de armazenamento para uma mesma área, em virtude de se atingir maiores ângulos da pilha e maiores densidades;</li> <li>• Possibilidade de fechamento progressivo, reduzindo a área de contribuição para a emissão de particulados (poeira), o que diminui a demanda de necessidade de aplicação de métodos de mitigação;</li> <li>• Controle na distribuição do resíduo dentro do depósito.</li> </ul>
<b>DESvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado número de caminhões trafegando constantemente na estrada de acesso ao destino;</li> <li>• Risco de acidentes durante a carga, transporte e descarga do resíduo;</li> <li>• Custo de manutenção dos caminhões;</li> <li>• Dificuldade de controle do fluxo do resíduo dentro do depósito;</li> <li>• Grandes áreas expostas por muito tempo, gerando emissão de particulados (poeira), até que se tenham condições para fechamento;</li> <li>• Acúmulo de água de chuva dentro do depósito;</li> <li>• Risco de galgamento dos diques por efluente em caso de erro na operação do sistema de drenagem do depósito;</li> <li>• Risco de galgamento dos diques por lama em caso de erro na operação do lançamento;</li> <li>• Maior tempo para fechamento exigido pela necessidade de aguardar a estabilização dos recalques para conclusão do monitoramento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferentes regras de operação para o período chuvoso e período seco;</li> <li>• Necessidade de delimitação de uma área específica no depósito para disposição do resíduo no período chuvoso;</li> <li>• Dificuldade no espalhamento e compactação do resíduo no período chuvoso;</li> <li>• Necessidade de implantação de sistema de drenagem superficial ao longo de toda a pilha de resíduo, para evitar a formação de processos erosivos;</li> <li>• Necessidade de manutenção das correias transportadoras;</li> <li>• Controle da emissão de particulados (poeira) durante a disposição.</li> </ul>

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.4 SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

O Quadro 2 apresenta as vantagens e desvantagens relacionadas à segurança, saúde e meio ambiente, do sistema de disposição operado com resíduo do Filtro Tambor com resíduo do Filtro Prensa.

Quadro 2 – Segurança, saúde e meio ambiente: Filtro Tambor e com rejeito do Filtro Prensa.

<b>ASPECTOS DE SAÚDE, SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE</b>		
	<b>FILTRO TAMBOR</b>	<b>FILTRO PRENSA</b>
<b>VANTAGENS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devido ao maior teor de umidade do resíduo, durante o lançamento do mesmo não há a geração de particulados (poeira).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor risco de acidentes devido à diminuição do tráfego de caminhões;</li> <li>• Possibilidade de fechamento progressivo da área, o que resulta em diminuição da emissão de particulado (poeira) e antecipando a integração da área ao meio ambiente;</li> <li>• Menor potencial de dano ambiental no caso de ruptura;</li> <li>• Maior segurança do sistema devido a não se ter armazenamento de água dentro do reservatório;</li> <li>• Melhor aproveitamento da área para disposição de maiores volumes de resíduo, postergando a necessidade de ocupação de novas áreas;</li> <li>• Menor teor de soda cáustica no resíduo a ser disposto, consequentemente representando um menor risco de contaminação do solo.</li> </ul>
<b>DESvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco de acidentes durante a carga, transporte e descarga do resíduo;</li> <li>• Grandes áreas expostas por muito tempo, gerando emissão de particulados (poeira), que podem causar danos à saúde dos operadores e das comunidades vizinhas, bem como da fauna e da flora no entorno;</li> <li>• Maior potencial de dano ambiental no caso de ruptura;</li> <li>• Menor segurança do sistema devido ao armazenamento de água dentro do reservatório.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração de particulados (poeira) durante a operação, que podem causar danos à saúde dos operadores e das comunidades vizinhas, bem como da fauna e da flora no entorno.</li> </ul>

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO FMEA

O Quadro 3 apresenta a avaliação de risco, onde foram analisadas as estruturas componentes e seus modos de falhas, suas causas e efeitos/consequências no meio ambiente, órgãos reguladores, imagem e inquietação pública e saúde e segurança. As matrizes dos resultados também são apresentadas a seguir (Figura 45 e 46).

Quadro 3 - Análise de Risco FMEA.

ANÁLISE DE RISCO FMEA											
ESTRUTURA	IDENTIFICAÇÃO	COMPONENTE	MODO DE FALHA	CAUSA	EFEITOS/ CONSEQUÊNCIAS	ESTÁGIO DO PROJETO	CONSEQUÊNCIAS				AÇÕES MITIGADORAS/ COMENTÁRIOS
							POSSIBILIDADE	MEIO BIÓTICO E USO DE SOLO	ÓRGÃOS REGULADORES	INQUIETANTE PÚBLICA PERDA DE IMAGEM	
1. Continuidade do avanço gradativo da plataforma atual em declive, da E1. 60 m até a E1. 43 m (Situação na fase de avaliação)	A1	Plataforma	Instabilização	Baixa resistência na fundação (resíduo com baixa resistência)	Ruptura global da plataforma. Transbordamento do efluente sobre o dique. Possibilidade de perdas de vida do operador do caminhão e/ou a jusante.	O M	A	E	E	E	Realização de investigações no resíduo de fundação para validação dos parâmetros de resistência considerados, e redução do aporte de água do resíduo. Encontrar solução de estabilização para o avanço da plataforma.
	A2	Plataforma	Instabilização	Declividade da rampa fora dos padrões de projeto, declive acentuado.	Perda de controle do equipamento. Tombamento do equipamento e danos ao operador. Possibilidade de perda de vida do operador do caminhão.	O M	B	A	E	A	Controle topográfico do avanço. Seguir os procedimentos de avanço da plataforma com material de boa qualidade e ou resíduo seco.
	A3	Diques de contorno do DRS1	Galgamento	Lançamento não controlado/ manejo inadequado dos resíduos	Escoamento da lama sem controle atingindo/ocupando a zona do buffer dos diques e galgamento da parede do depósito com contaminação a jusante	O A	M	A	A	M	Controle topográfico do avanço. Monitoramento visual da área do buffer. Seguir avanço da plataforma de forma controlada com material adequado ou resíduo seco.
	A4	Leira de Proteção	Instabilização	Leira de proteção com altura e/ou inclinação elevadas.	Ruptura da leira de proteção com escoamento do resíduo ocupando a zona do buffer dos diques e galgamento da parede do depósito com contaminação a jusante.	O A	M	A	A	M	As leiras são estruturas construídas com a função de direcionamento do resíduo lançado. Entretanto, as mesmas funcionam aleatoriamente como barramento. As leiras não possuem projeto e são localadas de forma aleatória (visual). Uma vez realizado o avanço da plataforma, com gradual rebaixo da mesma, é recomendada a eliminação destas estruturas. Seguir de avanço da plataforma com material adequado controlado ou resíduo seco.
2. Construção de acesso em curva de nível na porção norte do reservatório até a nova plataforma (construção do acesso operacional, para o novo posicionamento da plataforma, na porção oeste do depósito, com traçado em posição inferior, aproximadamente em curva de nível)	B1	Acesso Plataforma	Instabilização	Baixa resistência na fundação (resíduo com baixa resistência)	Ruptura da plataforma levando a ruptura do talude do acesso. Possibilidade de perda de vida do operador do caminhão.	O M	A	A	A	A	Realização de investigações no resíduo de fundação para validação dos parâmetros de resistência considerados, e redução do aporte de água do resíduo. Encontrar solução de estabilização para o avanço da plataforma.
	B2	Acesso Plataforma	Instabilização	Falha do sistema de drenagem superficial.	Obstrução do sistema de drenagem superficial com acúmulo de água na plataforma. Ruptura do acesso com fluxo sem controle de resíduo atingindo/ocupando a zona do buffer e galgamento do dique do depósito com contaminação a jusante.	O A	A	A	A	A	Estabelecer Plano de Controle de Lançamento de Resíduos com quantificação dos materiais depositados no local. Estabelecer Plano de disposição de resíduo controlado.
3. Construção de acesso operacional, para o novo posicionamento da plataforma, com traçado frontal em declive, partindo da elevação da plataforma atual (~ E1. 60 m) até a E1. 43 m (Corta futura). Nesta alternativa, o acesso seria posicionado na E1. 43,0 para a disposição do resíduo.	C1	Plataforma	Instabilização	Baixa resistência na fundação (resíduo com baixa resistência)	Ruptura global da plataforma. Transbordamento do efluente sobre o dique, contaminação a jusante. Possibilidade de perdas de vida do operador do caminhão e/ou a jusante.	O M	A	E	E	E	Durante o avanço da plataforma deve-se proceder com os controles tecnológicos para monitoramento/avanço de acordo com as recomendações das especificações técnicas de construção. Realização de investigações no resíduo de fundação ao longo do eixo de projeto do acesso para validação dos parâmetros de resistência considerados, e minimização de incertezas dos parâmetros. Estabelecer Plano de disposição controlado e com material e/ou resíduo seco.
	C2	Acesso Plataforma	Instabilização	Construção do acesso a nova plataforma com declive acentuado, fora dos critérios de projeto.	Perda de controle do equipamento. Tombamento do equipamento e danos ao operador - com potencial de morte do operador.	O B	B	A	E	A	Monitoramento topográfico durante o avanço gradativo da plataforma. Estabelecer Plano de disposição controlado em forma de aterro.

Fonte: Autor 2023

Figura 11 - Matriz de Risco FMEA.

		c				
		POSSIBILIDADE				
CONSEQUÊNCIA		IMPROVÁVEL (I)	BAIXO (B)	MODERADO (M)	ALTO (A)	ESPERADO (E)
		EXTREMO (E)				
ALTO (A)				A1 B1 C1	B2	
MODERADO (M)				A3 A4		
BAIXO (B)			C2	A2		
DESPREZÍVEL (D)						

		MATRIZ DE RISCO DO IMPACTO EM ÓRGÃOS REGULADORES				
		POSSIBILIDADE				
CONSEQUÊNCIA		IMPROVÁVEL (I)	BAIXO (B)	MODERADO (M)	ALTO (A)	ESPERADO (E)
		EXTREMO (E)				A1 C1
ALTO (A)			C2	A2 B1	A3 A4 B2	
MODERADO (M)						
BAIXO (B)						
DESPREZÍVEL (D)						

A- Continuidade do avanço gradativo da plataforma atual em declive, da E1. 60 m até a E1. 43 m (Situação na fase de avaliação)

B- Construção do acesso em curva de nível na porção norte do reservatório até a nova plataforma (construção do acesso operacional, para o novo posicionamento da plataforma, na porção oeste do depósito, com traçado em posição inferior, aproximadamente em curva de nível)

C- Construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, com traçado frontal em declive, partindo da elevação da plataforma atual (~ E1. 60 m) até a E1. 43 m (corta futura). Nesta alternativa, o acesso seria posicionado na E1. 43,0 para a disposição do resíduo.

Fonte: Autor 2023.

Figura 46 - Matriz de Risco FMEA.

MATRIZ DE RISCO DO IMPACTO PERANTE O PÚBLICO E IMAGEM						MATRIZ DE RISCO DO IMPACTO NA SAÚDE E SEGURANÇA							
		POSSIBILIDADE							POSSIBILIDADE				
		IMPROVÁVEL (I)	BAIXO (B)	MODERADO (M)	ALTO (A)	ESPERADO (E)			IMPROVÁVEL (I)	BAIXO (B)	MODERADO (M)	ALTO (A)	ESPERADO (E)
CONSEQUÊNCIA	EXTREMO (E)		C2	A1 A2 C1					A1 C1				
	ALTO (A)			B1	A3 A4 B2			C2	A2 B1	B2			
	MODERADO (M)									A3 A4			
	BAIXO (B)												
	DESPREZÍVEL (D)												

A- Continuidade do avanço gradativo da plataforma atual em declive, da E1. 60 m até a E1. 43 m (Situação na fase da avaliação)

B- Construção do acesso em curva de nível na porção norte do reservatório até a nova plataforma (construção do acesso operacional, para o novo posicionamento da plataforma, na porção oeste do depósito, com traçado em posição inferior, aproximadamente em curva de nível)

C- Construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, com traçado frontal em declive, partindo da elevação da plataforma atual (~ E1. 60 m) até a E1. 43 m (corta futura). Nesta alternativa a disposição do resíduo seria retomado após a conclusão do acesso.

Fonte: Autor, 2023.

Os eventos mais críticos, os quais foram classificados na Classe 4, da matriz de risco devem ter ação imediata para mitigação. Aqueles classificados na Classe 3 também devem ser minuciosamente avaliados e ações de mitigação implementadas em curto prazo. Estas situações de risco devem ter especial atenção, por se tratar de eventos reconhecidamente com nível de risco não aceitável.

Em linhas gerais, o resultado da análise de risco, mostram que:

- 6% dos riscos identificados encontram-se classificados como risco Classe 1 ou 2 (risco muito baixo a baixo ) e são, portanto, adequados.
- 47% dos riscos identificados encontram-se classificados como risco Classe 3 (risco moderado) e necessitam de ações para mitigação dos eventos.
- 47 % dos riscos identificados encontram-se classificados como risco Classe 4 (risco alto) e são, portanto, inadequados, o que configura uma situação emergencial. Necessitam de correção para mitigação dos eventos em caráter urgente.
- Nenhum risco foi identificado e classificado como risco Classe 5 (risco extremo).

Para análise dos Resultados do FMEA verificou que:

1. Continuidade do avanço gradativo da plataforma em declive, da El. 60 m até a El. 43 m (operação de disposição de rejeitos).

Para esta alternativa foram avaliados 4 (quatro) modos de falha em que 3 (três) foram classificados dentro da Classe de Risco Alto e 1 (um) foi classificado dentro da Classe de Risco Médio ou Moderado. Do ponto de vista da análise FMEA, esta é a opção que apresenta os maiores riscos associados ao avanço da plataforma, sendo, portanto, menos atrativa.

2. Construção do acesso em curva de nível na porção norte do reservatório até a nova plataforma (construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, na porção oeste do depósito, com traçado em posição inferior, aproximadamente em curva de nível).

Para esta alternativa foram avaliados 2 (dois) modos de falha sendo que 1 (um) foi classificado dentro da Classe de Risco Alto e 1 (um) foi classificado dentro da Classe de Risco Médio ou Moderado (Ver Nota 1).

3. Construção de acesso operacional, para novo posicionamento da plataforma, com traçado frontal e em declive, partindo da elevação da plataforma atual ( $\approx$  El. 60 m) até a El. 43 m (Cota futura). Nesta alternativa, a disposição do resíduo seria retomada após a conclusão do acesso.

Para esta alternativa foram avaliados 2 (dois) modos de falha sendo que 1 (um) foi classificado dentro da Classe de Risco Alto e 1 (um) foi classificado dentro da Classe de Risco Médio ou Moderado (Ver Nota 1).

Nota 1: Salienta-se que, dependendo das consequências dos efeitos sob os aspectos avaliados (meio ambiente, órgãos reguladores, inquietação pública e perda de imagem e saúde e segurança), um mesmo modo de falha pode ser enquadrado em diferentes classes de riscos. No entanto, a análise foi realizada considerando a classe de risco mais elevada dos modos de falhas avaliados.

Alternativa 1: A análise realizada indica Riscos Altos de operação relacionada ao avanço da plataforma praticado. Isto implica na necessidade, urgente, de modificação/adequação na metodologia empregada de avanço da plataforma/disposição de resíduo.

Alternativa 2 e 3: Também apresentam Riscos Altos. No caso da alternativa 2 deve-se atentar para a dificuldade de escoamento da água superficial pelo sistema de drenagem do acesso, o qual poderá funcionar como um barramento.

É fundamental que, para qualquer uma das alternativas elencadas, o avanço da plataforma aconteça com base em um projeto detalhado que estabeleça as diretrizes e metodologia de avanço, geometria da plataforma, limitações e direcionamento do rejeito.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs verificar o comportamento do resíduo de bauxita desaguado por filtro prensa compactado para sua disposição em aterros controlados, através de uma pesquisa com dados existentes de estudos para definição de um novo sistema de disposição de resíduos de bauxita e teve como finalidade a identificação dos riscos geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos associados ao avanço da plataforma de disposição de resíduo, para diferentes alternativas, empregando a metodologia FMEA - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. Esta metodologia permitiu a identificação e compreensão dos possíveis modos de falha do sistema de resíduos e seus efeitos. A análise serviu de ferramenta para classificação dos riscos de forma qualitativa, apoiando no desenvolvimento e priorização de ações de resposta aos riscos e no processo de tomada de decisão quanto a implantação de uma nova tecnologia de filtragem e disposição do resíduo de bauxita. Os testes realizados em campo com o resíduo possibilitaram o conhecimento do comportamento geomecânico e geotécnico deste material quando submetido à compactação por esteiramento e por rolo compactador.

Portanto, foi possível concluir que a disposição de resíduo de bauxita desaguado por filtros prensa, quando compactado com equipamentos de terraplenagem com rolo compactador e também esteirado com trator em camadas controladas e com umidade adequada, apresentam características que proporcionam sua disposição em forma de aterro compactado pode alcançar 3 a 4 vezes maiores volumes de estocagem em uma menor área, contribuindo para um menor impacto ambiental.

Porém, ressalta-se que cuidados com a qualidade do resíduo desaguado em termos de teor de sólidos devem ser garantido, seleção de equipamento de terraplenagem adequados, acompanhamento de execução que garanta o controle do grau de compactação e o teor de umidade correspondente, instalação de instrumentação no aterro, e estratégia de operação durante o período de clima úmido para evitar pilhas de retomadas e aumento de custos operacionais.

A pista teste utilizada para avaliação da compactação do resíduo de bauxita desaguado por Filtro Prensa apresentou-se eficaz para a determinação de diversos parâmetros do resíduo. Recomenda-se que para a implementação de um sistema de disposição de resíduos em camadas compactadas em aterros, a metodologia dessa pesquisa seja aplicada para se conhecer os parâmetros geotécnicos, a trabalhabilidade, os tipos de equipamentos de compactação e se os aterros construídos oferecem fatores de segurança satisfatórios para adoção desse método de disposição, também a realização de uma análise de risco para que seja elencados todos os riscos

envolvidos, sejam balizadores na tomada de decisão de alternativas de melhorias em sistemas de resíduos e rejeitos, quando se pretender realizar mudanças de sistemas de disposição e ou tecnologias que promovam grandes ganhos em termos de estabilidade, meio ambiente com redução de impactos devido ao uso de menores áreas para estocagem e operação de estruturas de resíduos e rejeitos. A análise de risco tipo FMEA realizada no método de disposição antigo, serviu para identificar os principais gatilhos e suas possibilidades de falha em decorrência do tipo de disposição e do método de desaguamento praticado, o que facilitou na tomada de decisão e definição de um novo sistema de filtração e método de disposição conforme estudo de caso dessa pesquisa.

Concluiu-se que o método, dry stacking praticado devido a tecnologia de filtragem por filtro tambor representava um risco por ser um tipo de aterro hidráulico e por sua maneira de ser depositada por meio de dutos ou por outro tipo de transporte, como por exemplo caminhões, dependendo da consistência final do material, o mesmo oferecia riscos de estabilidade, ambiental e operacional e necessitava de grandes áreas para estocagem de um volume limitado devido ao seu ângulo de repouso da ordem de 2 a 3.

Concluiu-se que o método dry disposal é o mais moderno dentre os processos de disposição de resíduos de mineração. São utilizados filtros-prensa de nova geração, para o desague do resíduo produzido pelo processo industrial o que significa um avanço ainda maior em relação ao método dry stacking utilizado no sistema de disposição anterior, verificado nessa pesquisa. Devido ao menor potencial de dano, menor risco, maior facilidade de fechamento e menor chance de contaminação esta é considerada a nova tendência para disposição deste tipo de resíduo industrial. Os filtros-prensa são utilizados para desaguamento destes resíduos, produzindo um material com aproximadamente 80% de teor de sólidos que, por este motivo, podem ser compactados com equipamentos de terraplenagem como em aterros convencionais com densidades e umidades controladas e em estruturas autoportantes, ou seja, pilhas, diques, maciços. Outra vantagem desse método é a redução do percentual de soda cáustica no resíduo final desaguado e o seu reaproveitamento no processo industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13029**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo — Determinação da granulometria. Método de ensaio – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AVERY, Q.; WILSON, K. Red mud pressure filtration for the alumina refinery's bauxite residue tailings disposal. In: **Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 225-238.

ÁVILA, J. P.; Nery, K.D.; Freire Neto, J.P.; PANTOJA, R. Dry Storage Technology-Strength and Pore Pressure Development and Compactability of Tailings. In: **Proceedings of the 19 th International 87 Symposium of ICSOBA-International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium**, Belém-PA, Brasil. 2012.

ÁVILA, J.P; SAWYIA MARTHA. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. **As Barragens de Rejeitos no Brasil: Sua evolução nos últimos anos**, Rio de Janeiro : CBDB, 2011.

BÁRDOSSY, G.; ALEVA, G. J. J. **Lateritic bauxites**. Akadémiai Kiadó, 1990.

BARDOSSY, G. Y.; SZABO, E. Quantification of depositional features of lateritic bauxite deposits. **Records of the Geological Survey of India**, v. 114, n. 5, p. 5-9, 1982.

CASTILHO, B. M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CASTILHO B., M. C., DINIZ L., PANTOJA R., State-of-the-art Bauxite Tailings Disposal Facilities and Techniques. In: **TRAVAUX 48, Proceedings of the 37th International ICSOBA Conference and XXV Conference «Aluminium of Siberia»**, Krasnoyarsk, Russia, 16 – 20 September, 2019.

DT-3540-54-G-316 - **Avaliação da Vida Útil do Sistema de Disposição de Resíduos Utilizando Filtro Tambor / Filtro Prensa**, (Alunorte-2012).

FRANÇA, S. C. A.; TRAMPUS, B. C. Desaguamento de rejeitos minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeito convencionais. In: CETEM/MCTIC (Série Tecnologia Ambiental, 102), Rio de Janeiro, 2018. ISSN 0103-7374.

FRANKS D.; STRINGER M.; TORRES-CRUZ L.; BAKER E.; VALENTA R.; THYGESEN K., MATTHEWS A.6, HOWCHIN J. Tailings facility disclosures reveal stability risks. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 5353, 2021.

GRUBB, P. L. C. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon basin and Guianas coastal plain. **Economic Geology**, v. 74, n. 4, p. 735-750, 1979.

GUEDES, G. B.; SCHNEIDER, C. L. Disposição de Rejeitos de Mineração : As Opções Tecnológicas para a Redução dos Riscos em Barragens. In: **XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, p. 9, 2017.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E.S; PERES, A. E.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 65, p. 543-548, 2012.

KOTSCHOUBEY, B. Geologia de alumínio. In: **Principais depositos minerais do Brasil**. 1988. p. 599-619.

HOND, R.D.; BROUWER, M. Design aspect of bauxite residue storage areas. Bauxite Residue Seminar 2011 – ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite. **Alumina & Aluminium, Travaux**. v. 36, n. 40, p. 66-74, 2011.p. 66-74.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração**. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. p. 128. Brasília: IBRAM, 2016.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Risk assessment in dam safety management: a reconnaissance of benefits, methods and current applications**. Bulletin 130. Paris: ICOLD, 2005, 276 p.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **80 years: dams for human sustainable development**. Paris: CIGB/ICOLD, 2008a.

INTERNATIONAL COUNCIL OF MINING AND (ICMM). **Global Industry Standard on Tailings Management (the Standard)**. 2020.

INTERNATIONAL COUNCIL OF MINING AND (ICMM). **Os Protocolos de Conformidade. Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos**. 2021.

LEITE, S. R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. 2019. 222 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Computação Aplicada)-Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

LI, L.Y.; RUTHERFORD, G. K. Effect of bauxite properties on the settling of red mud. **International Journal of Mineral Processing**, v. 48, n. 3-4, p. 169-182, 1996.

LOPES, L. M.; CARVALHO, A. Gênese da bauxita de Mirai, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 4, p. 462-469, 1989.

LOUZADA, M. Z.; BIGANSOLLI, A. R.; DE LIMA-KÜHN, B. B. Uso da Técnica de Difração De Raios X–Caracterização Microestrutural de Bauxita por Difração de Raios X. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 8, p. 1151-1158, 2017.

MELO, A. V. **Análises de Risco Aplicadas a Barragens de Terra e Enrocamento: Estudo de Caso de Barragens da CEMIG GT**. 2014. 244 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes)-Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim do Setor Mineral**. 8. ed, Brasília, 2022.

NERY, K. D. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes)-Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

PEIXOTO, R. J. **Avaliação da gestão de resíduos sólidos com características urbanas em mineradoras na Região Norte**. 2012. 80f. Monografia (Especialização em Saneamento e Meio Ambiente)-Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.  
PIMENTA, M. L. B. Abordagens de riscos em barragens de aterro. Lisboa: LNEC, 2009. 570 p.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Review of current bauxite residue management, disposal and storage: practices, engineering and science. **Asia-Pacific Partnership Project ATF-06-3, CSIRO Document DMR-3608**, 2009.

RESTALLACK, Gregory J. Lateritization and bauxitization events. **Economic Geology**, v. 105, n. 3, p. 655-667, 2010.

RT-3541-54-G-280 - **Relatório Técnico de Acompanhamento das Pistas Experimentais (Alunorte-2016)**.

ROBERTSON, A. MACG. E SHAW, S. A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil. **Energy Reports**, v. 7, p. 4412-4424, 2021.

SANTOS, F. S. **Operações unitárias da tecnologia ambiental – Filtração**. Apresentação de seminário. Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro. 2004.

SANTOS, R. N. C. **Enquadramento das Análises de Risco em Geotecnia**. 2007. 257 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2007.

STELA, L. H.; DUARTE, J. C.; PEREIRA, C. O. Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, v. 1, n. 1, p. 34-45, 2020.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C.; 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, P. H. A. **Simulação Numérica das Poropressões em Aterros Construídos com Resíduo da Produção de Alumina Desaguado por Filtros Prensa**. 2020. 193 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

VALADÃO, G. E. S. **Separação Sólido-Líquido**. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de Desaguamento e Disposição de Rejeito da Bauxita: Estudo de Caso e Avaliação Econômica**. 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo. 509 p, 1977.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de Bauxita**. 2002. 443 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

VALERIUS, M. B. (2014). Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

## Página de assinaturas



**Debora Moreira**  
936.180.772-20  
Signatário

### HISTÓRICO

- 04 abr 2024**  
15:12:45  **Debora Dias Costa Moreira** criou este documento. (E-mail: [deboradias@ufpa.br](mailto:deboradias@ufpa.br), CPF: 936.180.772-20)
- 04 abr 2024**  
15:12:46  **Debora Dias Costa Moreira** (E-mail: [deboradias@ufpa.br](mailto:deboradias@ufpa.br), CPF: 936.180.772-20) visualizou este documento por meio do IP 177.104.242.77 localizado em Tucuruí - Pará - Brazil
- 04 abr 2024**  
15:12:48  **Debora Dias Costa Moreira** (E-mail: [deboradias@ufpa.br](mailto:deboradias@ufpa.br), CPF: 936.180.772-20) assinou este documento por meio do IP 177.104.242.77 localizado em Tucuruí - Pará - Brazil

