



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**MÔNICA FERREIRA MOREIRA**

**COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO  
DE FERRO**

**CRATEÚS**

**2024**

MÔNICA FERREIRA MOREIRA

COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DE REJEITO FILTRADO DE MINÉRIO DE  
FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Campus Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. MSc. Marcio Avelino de Medeiros

CRATEÚS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M838c Moreira, Mônica Ferreira.  
Comportamento hidromecânico de rejeito filtrado de minério de ferro / Mônica Ferreira Moreira. – 2024.  
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2024.  
Orientação: Prof. Me. Márcio Avelino de Medeiros.

1. Rejeito filtrado. 2. Empilhamento. 3. Modelagem numérica. 4. Gestão de rejeitos. I. Título.  
CDD 622

---

MÔNICA FERREIRA MOREIRA

COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DO REJEITO FILTRADO DO MINÉRIO DE  
FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará do Campus Crateús, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. MSc Marcio Avelino de Medeiros (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Thiago Fernandes da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Weber Anselmo dos Ramos Souza  
Université du Québec en Abitibi – Témiscamingue (UQAT)

A Deus por me iluminar e fortalecer nos momentos difíceis. Mãe, você foi fundamental para mim nesse momento.

## **AGRADECIMENTOS**

Queria agradecer primeiramente a Deus por essa conquista, pois sem ele nada é possível. A minha mãe que fez tudo por mim, ao Google e YouTube que me ajudou no sufoco com algumas aulas. Queria agradecer também a todos os professores que acreditaram no meu potencial, em especial a professores, Janaina Leitinho, Marcio Melo e ao meu orientador professor Marcio Avelino pela orientação, paciência e oportunidades que me proporcionou. Ao pessoal da DAE em especial a Gerlandia que é maravilhosa, a Keiva Maria e aos grandes amigos que fiz na Biblioteca, Lili uma diva sem precedente.

A graduação é uma fase louca da vida, que nos ensina como será no futuro, mas também nos traz muitas pessoas, eu queria agradecer pelos meus grandes amigos que me apoiaram nos momentos difíceis, em especial a minha metade Lucas por resgatar e estar comigo até o fim, junto a minha outra metade Mara Joyce que me alimentou, me incentivou a fazer skin care e esteve sempre comigo nessa jornada maluca cheia de altos e baixos, reprovações e aprovações.

“O sonho é que leva a gente frente. Se a gente  
for seguir a razão, fica aquietado, acomodado”

(Ariano Suassuna)

## RESUMO

A geração de resíduos no setor de mineração é um dos maiores desafios enfrentados pela indústria, pois muitos desses resíduos são comumente depositados em barragens, que ao longo dos anos demonstraram ser grandes riscos ao meio ambiente e à vida humana. A proibição de barragens do tipo a montante, imposta por novas legislações, destaca a necessidade de alternativas seguras para a deposição de rejeitos. A pesquisa foca no empilhamento de rejeitos filtrados como uma solução promissora. Para isso, diversos fatores são investigados, como coesão, ângulo de atrito e teor de água, que afetam a estabilidade dessas pilhas. O comportamento hidromecânico do rejeito filtrado de minério de ferro foi analisado em três modelos diferentes de empilhamento com fundações de argila e areia, utilizando o software Plaxis 2D para simular tensões, deformações e deslocamentos. Diante da crescente preocupação com a gestão de rejeitos, especialmente após acidentes graves com barragens que causaram danos ambientais e sociais, a modelagem numérica foi empregada para simular diferentes cenários, permitindo uma análise detalhada do comportamento dos rejeitos em condições variáveis. Os resultados evidenciaram a importância da calibração dos modelos constitutivos e a influência de variáveis mecânicas, hidráulicas e de poropressão no desempenho das pilhas. Os resultados mostraram que pilhas com até 150 metros de altura, nas condições estudadas, não são viáveis sem ajustes nas fundações e nos parâmetros. Modelos com fundações reforçadas apresentaram maior estabilidade, mas ainda limitados a alturas de até 120 metros. A discussão dos dados ressalta a relevância de práticas de engenharia que garantam segurança e sustentabilidade a longo prazo na gestão de rejeitos.

**Palavras-chave:** rejeito filtrado; empilhamento; modelagem numérica; gestão de rejeitos.

## ABSTRACT

Mining waste is one of the biggest problems generated by the sector, and is commonly deposited in the form of dams. The generation of waste in the mining sector is one of the industry's biggest challenges, as much of this waste is commonly deposited in dams, which over the years have posed significant risks to the environment and human life. The ban on upstream dams, imposed by new legislation, highlights the need for safe alternatives for tailings disposal. The research focuses on the stacking of filtered tailings as a promising solution. For this, various factors are investigated, such as cohesion, friction angle, and water content, which affect the stability of these piles. The hydromechanical behavior of filtered iron ore tailings was analyzed in three different stacking models with foundations of clay and sand, using Plaxis 2D software to simulate stresses, deformations, and displacements. Amid the growing concern about tailings management, especially after severe dam accidents that caused environmental and social damage, numerical modeling was employed to simulate different scenarios, allowing a detailed analysis of the behavior of the tailings under variable conditions. The results highlighted the importance of calibrating constitutive models and the influence of mechanical, hydraulic, and pore pressure variables on pile performance. The results showed that piles up to 150 meters high, under the studied conditions, are not viable without adjustments to the foundations and parameters. Models with reinforced foundations showed greater stability but were still limited to heights of up to 120 meters. The data discussion underscores the relevance of engineering practices that ensure long-term safety and sustainability in tailings management.

**Keywords:** Filtered tailings; Pile stability; Numerical modeling; Sustainable mining;

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | – Métodos construtivos de barragem .....   | 19 |
| Figura 2  | – Tipos de pilha .....   | 22 |
| Figura 3  | – Método de Bishop .....   | 25 |
| Figura 4  | – Método de Morgenstern-Price .....  | 26 |
| Figura 5  | – Método de Janbu Simplificado .....   | 27 |
| Figura 6  | – Método de Spencer .....  | 28 |
| Figura 7  | – Fluxograma do desenvolvimento da Metodologia .....   | 31 |
| Figura 8  | – Configuração de construção .....   | 34 |
| Figura 9  | – Malha de elementos finitos gerada pelo Plaxis 2D para a pilha .....                                      | 35 |
| Figura 10 | – Fluxograma das etapas de simulação numérica .....  | 35 |
| Figura 11 | – Poropressões do Modelo 1 .....   | 36 |
| Figura 12 | – : Deslocamentos do modelo 1 para a fase de construção 4. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y. .... | 36 |
| Figura 13 | – Poropressões do Modelo 2 .....   | 37 |
| Figura 14 | – Deslocamentos do modelo 2 para a fase de construção 15. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y.....   | 37 |
| Figura 15 | – Poropressões da Modelo 3 .....   | 37 |
| Figura 16 | – Deslocamentos do modelo 3 para a fase de construção 16. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y. ....  | 38 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 1. .... | 37 |
| Gráfico 2 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 2. .... | 39 |
| Gráfico 3 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 3. .... | 40 |

## LISTA DE QUADRO

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Técnicas de Filtragem ..... | 21 |
|--|----|

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Produção aproximada de estéril e Rejeito no período de 2010 a 2019 .....  | 18 |
| Tabela 2 – Classificação dos tipos de rejeitos .....                                 | 19 |
| Tabela 3 – Fator de Segurança .....  | 24 |
| Tabela 4 – Fatores de segurança propostos para taludes de rejeito de mineração ..... | 24 |
| Tabela 5 – Fatores de segurança para pilhas de rejeito filtrado e compactado .....   | 24 |
| Tabela 6 – Tabela de trabalhos correlatos .....                                      | 30 |
| Tabela 7 – Situação de Análise .....   | 31 |
| Tabela 8 – Parâmetros de entrada para o modelo Cam-Clay Modificado .....             | 32 |
| Tabela 9 – Parâmetros de entrada para o modelo de Morhr-Coulomb .....                | 32 |
| Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o modelo de Morhr-Coulomb para areia .....    | 32 |
| Tabela 11 – Parâmetros de entrada para o modelo Hardening Soil dos Rejeitos .....    | 33 |
| Tabela 12 – Fatores de segurança obtidos .....                                       | 38 |
| Tabela 13 – Situações de Análise .....   | 38 |

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                          | 14 |
| 1.1      | Motivação da Pesquisa .....                      | 15 |
| 1.2      | Justificativa da Pesquisa .....                  | 15 |
| 1.3      | Objetivos .....                                  | 16 |
| 1.3.1    | <i>Objetivos Específicos</i> .....               | 16 |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....               | 17 |
| 2.1      | Estéril e Rejeito .....                          | 17 |
| 2.2      | Rejeito Convencional .....                       | 19 |
| 2.3      | Rejeito Filtrado .....                           | 20 |
| 2.4      | Pilha de Estéril e Rejeito.....                  | 21 |
| 2.5      | Estabilidade de Taludes .....                    | 22 |
| 2.5.1    | <i>Método de Bishop Simplificado</i> .....       | 25 |
| 2.5.2    | <i>Método de Morgenstern-Price</i> .....         | 25 |
| 2.5.3    | <i>Junbu Simplificado</i> .....                  | 26 |
| 2.5.4    | <i>Método de Spencer</i> .....                   | 27 |
| 2.6      | Modelagem Numérica/ Computacional .....          | 28 |
| 2.6.1    | <i>Métodos dos Elementos Finitos (MEF)</i> ..... | 29 |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....                         | 31 |
| 3.1      | Descrição do Problema .....                      | 31 |
| 3.2      | Parâmetros dos Materiais .....                   | 31 |
| 3.3      | Condições Iniciais .....                         | 33 |
| 3.4      | Calibração do Modelo Numérico .....              | 35 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCURSSÕES</b> .....            | 36 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                           | 41 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                         | 43 |

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas enfrentados na mineração é a deposição de resíduos, visto que se produz material sem valor agregado em grandes quantidades. Como consequência, a deposição e o armazenamento desses materiais requerem uma análise profunda com o intuito de garantir meios de locação que gerem a segurança necessária e o menor impacto possível para o meio ambiente (ROMANEL, 2018).

Segundo Leonida (2020), projetos errôneos e o mau gerenciamento de instalações de armazenamento de rejeitos a úmido representam um risco significativo para a vida humana e a biodiversidade da região onde se encontram. Nos últimos 10, anos acidentes envolvendo barragens de rejeito provocaram perdas ambientais e humanas como Mount Polley no Canada, Samarco no Brasil, entre outros grandes acidentes envolvendo essa técnica.

Em decorrência dos acidentes graves com essas estruturas de contenção, como a ruptura das barragens do Fundão e Córrego do Feijão, que geraram danos à população e ao ecossistema da região, houve a criação da Lei 14.066/20 de 1º de outubro de 2020, que proíbe a construção de novas barragens do tipo “a montante” e o descomissionamento das já existentes (BRASIL, 2020). Com a atual legislação, uma das formas de depósito desse material, é o método de deposição do rejeito filtrado, que vem ganhando destaque, conseguindo aumentar o teor de sólido por meio de prensagem e filtração, sendo possível a deposição das formas, com percentagens aceitáveis para sólidos: polpa de alta densidade, entre 57% a 68%; pasta minerais, de 60% a 70% e tortas, entre 75% a 85% (NERY 2013).

Diante desse cenário de catástrofes, a cobrança e a legislação para o setor mineral têm sofrido diversas mudanças na deposição dos rejeitos gerados. Devido à necessidade de adequar depósitos de rejeito a essas mudanças, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas. A literatura técnica mostra que filtração e empilhamento de rejeito é uma alternativa economicamente viável a essa proibição (Davies 2011; Ulrich e Coffin 2013; Crystal et al., 2018), mostram que a técnica de filtração e empilhamento de rejeito é uma alternativa viável para a deposição deste material.

O rejeito filtrado consiste no desaguamento do material, o qual é descartado do processamento do bem mineral. Após a sua filtração, o material será depositado em forma de pilhas. Para o empilhamento desse material, é necessário realizar estudos de estabilidade com base nos parâmetros que o material apresentará após a separação da polpa.

A revista In The Mine (2019) cita exemplos de empreendimentos que utilizam a técnica do rejeito filtrado no Brasil, entre eles temos as minas Cuiabá, Córrego do Sítio e Planta do Queiroz em Minas Gerais da empresa AngloGold, Mina da CBA em Miraf Minas Gerais,

Mina Roça Grande, Complexo de Mineração Caeté (CCA) em Minas Gerais. A literatura apresenta parâmetros geotécnicos propostos por alguns autores. Espósito (2000) fala da alteração em função das variações granulometria e porosidade. Presotti (2002) fala que o percentual de ferro presente no rejeito tem grande influência na filtragem e compactação. Silva (2014) ressalta o grau de compactação.

A análise de estabilidade será realizada por meio de modelagem computacional através do software Plaxis 2D, com base nos cálculos do MEF (Método dos Elementos Finitos), visando obter dados como tensão, deformação, deslocamento e poropressões envolvidas no sistema, bem como fatores de segurança para os taludes das pilhas.

### **1.1 Motivação da Pesquisa**

Estéreis e rejeitos são classificados na Lei 12.305/2010, a Lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos, na categoria de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). O art. 13 da mesma lei denomina os resíduos provenientes de atividades mineradoras como resíduos de mineração. (THOMÉ; LAGO, 2017).

A regulamentação das técnicas de deposição do estéril e rejeito segue a NRM –19 (Norma Regulamentadora de Mineração) do ano de 2001, que descreve os métodos corretos para a deposição dos rejeitos. Contudo, após os acidentes envolvendo barragens de rejeito, criou-se a resolução da ANM 4/2019 que estabelece a proibição da construção de barragens do tipo a montante. A norma também estabelece medidas de segurança e estabilidade de barragens de mineração.

### **1.2 Justificativa da Pesquisa**

A deposição de rejeitos era comumente feita por meio de barragens do tipo alteadas, a montante, linha de centro ou a jusante. No entanto, segundo o relatório de segurança de barragens de 2021, incidentes de rompimento envolvendo o método “a montante” nas cidades de Itabirita em 2014, Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, todas no estado de Minas Gerais, colocaram em questão a estabilidade e a funcionalidade desse método. Como resultado, foi criada a Resolução n.º 4, de 15 de novembro de 2019, que proíbe a construção de barragens a montante e regulamenta as práticas de deposição de rejeitos. Com essa nova realidade, surgiu a necessidade de estudar outras formas de deposição de rejeitos, e a deposição do rejeito em forma de pilhas tornou-se uma solução para essa problemática.

Tendo em vista isso, a modelagem numérica se faz essencial para entender o comportamento desse material em diversos cenários.

### **1.3 Objetivos**

Analisar o comportamento hidromecânico dos rejeitos filtrados do minério de ferro por meio de modelagem numérica via método dos elementos finitos.

#### **1.3.1 Objetivos Específicos**

- Analisar a estabilidade de pilhas de rejeito filtrado para diferentes alteamentos;
- Verificar a influência da variabilidade dos parâmetros de resistência em seu comportamento hidromecânico;
- Avaliar o efeito das poropressões geradas em função das velocidades de alteamento das pilhas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considera-se que a mineração tem grande relevância para o desenvolvimento humano, já que fornece a matéria-prima para a produção de itens essenciais para setores como: de saúde, agricultura e indústria em geral. Tendo participação significativa na economia do país, estima-se que nos anos de 2019 e 2020 o setor de mineração teve aproximadamente 3,190% e 3.180% de contribuição no PIB — Produto Interno Brasileiro. (SANTOS, 2021).

O Brasil produz mais de 56 tipos de minerais, segundo dados de 2010 do Anuário Mineral Brasileiro do extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), da atual Agência Nacional de Mineração (ANM). Esses minerais podem ser classificados em diversas categorias, incluindo:

- Metálicos: Alumínio (Bauxita), Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Estanho, Ferro e Lítio;
- Não metálicos: Amianto, Areia, Areias Industriais, Argilas, Bário, Calcário, Caulim, Cianita e outros minerais refratários, Diatomita, Dolomito e Magnesita, Enxofre, Feldspato e outras cargas minerais, Vermiculita e Perlita, Diamante e gemas;
- Minerais energéticos: Carvão Mineral, Turfa, Urânio e outros radioativos;

O Anuário Mineral Brasileiro, com base em estudos realizados em 2021, destacou que as principais substâncias metálicas produzidas no Brasil em 2022 totalizaram 312,9 bilhões de toneladas. Entre essas substâncias metálicas, destacam-se 11 principais, que incluem Alumínio, Cobre, Estanho, Ferro, Manganês, Nióbio, Níquel, Ouro, Vanádio e Zinco. Essa produção resultou na arrecadação de 9,77 bilhões de reais pelo CEFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais) em 227 minas com produção ativa, com 75,4 bilhões de reais em exportações. (ANM, 2022)

Entretanto, essa atividade é uma das maiores geradoras de resíduos sólidos no país. A geração de estéréis e rejeitos no processo de extração e beneficiamento do bem mineral tem se tornado cada vez mais uma preocupação recorrente, tanto para as empresas quanto para os órgãos federais ambientais. Isso ocorre, pois na grande maioria dos casos, essas ações são irreversíveis, causando alterações estéticas, geotécnicas com a criação de barragens e pilhas de rejeito, bem como impactos econômicos significativos.

### 2.1 Estéril e Rejeito

Na atividade de mineração são gerados dois tipos de resíduos sólidos: Estéril e Rejeito (THOMÉ; LAGO, 2017). Segundo a ANM (2020), o estéril consiste no material

descartado diretamente na operação de lavra, sem ser processado e beneficiado, já o rejeito é separado do bem mineral e descartado durante ou após o processamento e beneficiamento.

Conforme afirma a ANM (2020), que apresentou os dados do Relatório Anual de Lavra (RAL) dos anos de 2010 a 2019, o Brasil teve uma produção de 8,2 bilhões de toneladas de estéril e 3,4 milhões de toneladas de rejeito considerando as 11 principais substâncias metálicas, como mostra na tabela 1 a produção de rejeito de acordo com o mineral de interesse.

Na tabela 1, observa-se que a produção brasileira de estéril e rejeito consiste em uma quantidade significativa, gerando impactos ambientais nos meios onde se encontram os empreendimentos de mineração.

Tabela 1 – Produção aproximada de estéril e Rejeito no período de 2010 a 2019

| <b>Substancia</b> | <b>Estéril (Mt)</b> | <b>Estéril (%)</b> | <b>Rejeito (Mt)</b> | <b>Rejeito (%)</b> |
|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Ferro             | 3,921               | 47,93              | 1,372               | 40,87              |
| Alumínio          | 1,175               | 14,37              | 131                 | 3,89               |
| Cobre             | 1.092               | 13,35              | 497                 | 14,78              |
| Ouro              | 520                 | 6,36               | 687                 | 20,45              |
| Fosfato           | 478                 | 5,84               | 290                 | 8,64               |
| Carvão            | 415                 | 5,07               | 58                  | 1,72               |
| Níquel            | 292                 | 3,57               | 63                  | 1,88               |
| Estranho          | 122                 | 1,50               | 223                 | 6,64               |
| Manganês          | 106                 | 1,30               | 16                  | 0,49               |
| Vanádio           | 26                  | 0,31               | 3                   | 0,10               |
| Zinco             | 19                  | 0,23               | 10                  | 0,28               |
| Cromo             | 14                  | 0,17               | 9                   | 0,27               |
| <b>Total</b>      | <b>8,180</b>        | <b>-</b>           | <b>3,358</b>        | <b>-</b>           |

Fonte: ANM (2020).

Conforme estabelecem as Normas Reguladoras de Mineração (NRM), a disposição de estéril, rejeitos e produtos deve ser prevista no Plano de Lavra (PL). Além disso, a construção de depósitos para esses materiais deve ser precedida por estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos. As técnicas mais utilizadas para a deposição desses materiais incluem pilhas e barragens.

O estéril é comumente depositado em forma de pilhas, visto que não existe casos de rupturas que geraram grandes perdas econômicas e ambientais. Por outro lado, o rejeito é proveniente dos processos de beneficiamento para concentração do minério de interesse. Nessas atividades, frequentemente utiliza-se água no processo, resultando em polpas de rejeito depositadas em barragens. Ulrich (2019) classifica rejeito em quatro categorias: rejeito de lamas convencionais, rejeitos engrossados, colar rejeito e bolo de filtro que atende os parâmetros de tensão de escoamento e o teor de sólidos, conforme demonstrado na tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos tipos de rejeitos.

| Classificação de Rejeito       | Tensão de escoamento (Pa) | Teor de sólido típico (%) |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Rejeito em pasta convencionais | < 5 a 20                  | < 50                      |
| Rejeito espessados             | 20 a 100                  | 50 a 70                   |
| Colar Rejeito                  | 100 a 800                 | 70 a 85                   |
| Rejeito Filtrado               | >800                      | > 85                      |

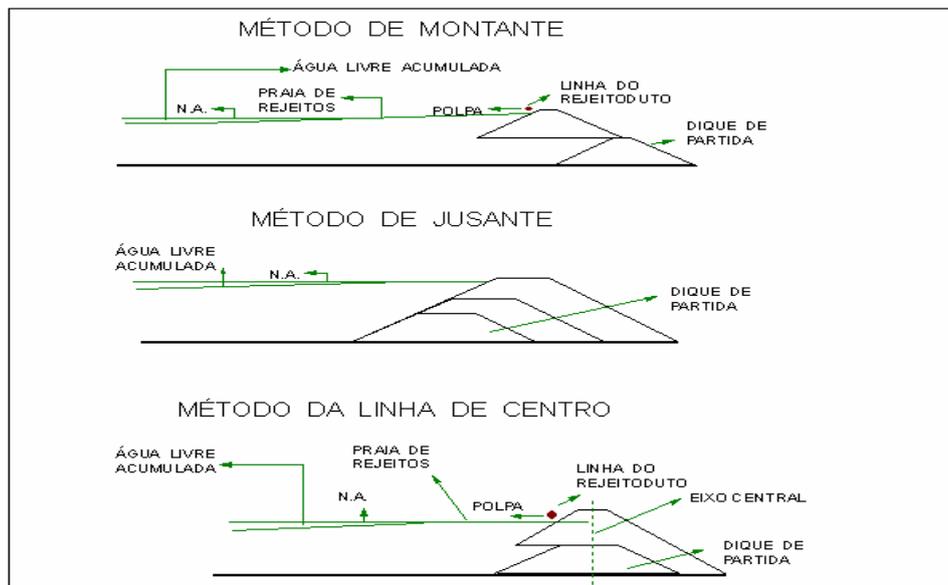
Fonte: Ulrich,2019

## 2.2 Rejeito Convencional

Entende-se por rejeito convencional os materiais em pasta com o teor de sólido de aproximadamente 35% Souza (2020) e os processos de solubilização do material com a aderência de líquido vão conforme a sua composição mineralógica (BOCCAMINO, 2017).

Esse material é frequentemente disposto em formas de barragens, que podem ser nos métodos de montantes, a jusante ou linha de centro. Por serem materiais em forma de polpa, sofrem com o problema de liquefação. Segundo Ferreira (2019), a liquefação é compreendida como a perda da resistência por poropressão e a suscetibilidade a esse efeito é fortemente influenciada pela granulometria do material. Na Figura 1 apresenta-se a configuração dos métodos de barragens e a vulnerabilidade à liquefação.

Figura 1 – Métodos Construtivos de Barragem.



Fonte:Esposito,(2000).

## 2.3 Rejeito Filtrado

Rejeito filtrado é o material de descarte proveniente dos processos de beneficiamento, que passou por atividades de filtragem para ser depositado em forma de pilhas

(LUPO; HALL, 2010). Em seu estudo, Guimarães et al., (2012) lista as vantagens que o rejeito filtrado apresenta em relação aos métodos de deposições convencionais em formas de barragens, sendo elas: redução do consumo de água, o rejeito filtrado pode ser empilhado reduzindo a área necessária para disposição, diminui o impacto ambiental, reduz o custo de construção de barragens. Além disso, Ulrich (2019) também destaca que essa técnica apresenta uma melhoria nas propriedades mecânicas desses materiais.

O desenvolvimento do rejeito filtrado não chegou a ter grande adesão por conta do seu alto custo econômico para a implantação, se comparado aos métodos comuns de deposição do rejeito em polpa. Mas, com a falta de segurança apresentada pelos métodos convencionais no decorrer dos anos e as novas legislações do país que proíbem a construção da barragem do tipo a montante, o rejeito filtrado tem ganhado aceitação nas minerações. Bem como o desenvolvimento de estudos que visam maneiras de utilizá-lo com baixo custo de implementação.

Quanto à filtragem, entende-se como a separação da polpa, ou seja, sólido e líquido, podendo ser classificada como rejeito filtrado a úmido (wet cake tailings) e rejeito filtrado a seco (dry cake tailings). Sendo os principais fatores que afetam as taxas de filtragem, a queda de pressão entre a alimentação e o lado mais distante do meio filtrante, a área de superfície filtrante, a viscosidade dos filtrados, a resistência da torta e a resistência do meio filtrante (BOCCAMINO,2017).

Conforme aponta Davies (2011), as filtrações podem ocorrer usando pressão ou força de vácuo. A origem do material e a mineralogia são importantes quando se trata das filtrações. Ainda nesse sentido, Guimarães et al. (2012) apresentam os métodos de filtração conforme apresentado no quadro 1.

Quadro 1 – Técnicas de Filtração.

| <b>Tipos</b>          | <b>Características</b>   | <b>Modelo de Filtro</b>  |
|-----------------------|--|--|
| Filtração a Vácuo     | Criada uma pressão negativa de baixo do meio filtrante                             | Filtro de 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 | Ceramic  |

Fonte: Guimarães,2012

De acordo com Davies (2011), uma instalação de rejeito filtrado reduz 25% a 50% o consumo de água em relação ao rejeito disposto na forma convencional, a saturação é de 60% a 80%. Segundo Lupo e Hall (2010), ao projetar uma pilha de rejeito filtrado, tende-se a considerar características como tamanho da partícula, resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica e compressibilidade.

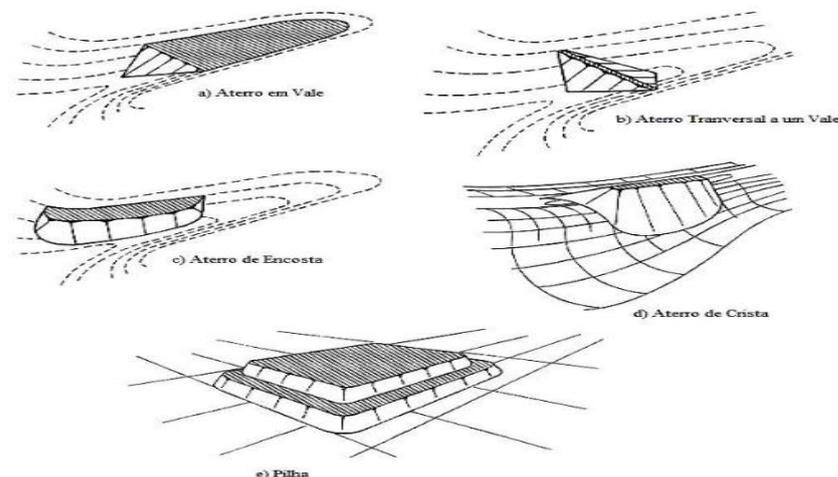
## 2.4 Pilha de Estéril e Rejeito

Para Aragão (2008), a elaboração de pilhas de Estéril e Rejeito é uma das estruturas geotécnicas mais importantes nos empreendimentos de mineração, sendo fundamental o planejamento, já que os custos dessa etapa de produção são altos. Segundo Aragão (2008), a construção de pilhas deve compreender os seguintes passos: a preparação da fundação com a limpeza da cobertura vegetal e os métodos drenantes, controle de águas superficiais, método construtivo, operação e interação entre projeto e construção.

A norma que regulariza a construção e implementação de pilha, ABNT NBR 13028 2006 que foi atualizada para ABNT NBR 13029 de 2017, especifica os critérios básicos para o desenvolvimento de uma pilha, define bancos, bermas, altura, ângulos de taludes, fatores de segurança entre outras regras que devem ser seguidos.

A construção das pilhas de deposição pode ser de forma descendente ou ascendente. O método ascendente divide-se em dois: camadas com espessuras de até 1,5 m ou bancadas com bancos de 10:15:20 metros. O descendente não é indicado, pois sua camada posterior é suportada no pé do talude anterior. Nesse método, a fundação e os taludes naturais do pé da pilha frequentemente são quem controlam a estabilidade. (ARAGÃO, 2008; NUNES, 2014). A literatura classifica pilhas conforme o local de fundação e a configuração, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de Pilhas



Fonte: Aragão, (2008).

Conforme Boccamino(2017), os fatores que determinam as características e as propriedades geotécnicas dos rejeitos são: a geologia da rocha explorada, a concentração de um dado mineral e a intensidade do tratamento.

## 2.5 Estabilidade de Taludes

Segundo Reis (2022), taludes são superfícies inclinadas de maciços terrenos, rochosos ou solo, e rocha que forma ângulo com a superfície, podendo ocorrer de duas formas: natural ou artificial.

Com isso Aragão (2008) adota os seguintes fatores para a estabilidade física de pilhas, sendo eles: A configuração da pilha, inclinação do talude de fundação e grau de confinamento, tipos de fundação, qualidade do material da pilha, método de construção, condições piezométricas e climáticas, taxas de disposição, sismicidade. Considera-se também que a configuração e as dimensões da pilha têm grande influência na estabilidade.

Segundo Costa (2005), a análise de estabilidade de taludes é realizada através da abordagem do equilíbrio limite, com a suposição da existência de uma superfície de escorregamento com forma conhecida, sendo elas planas, circulares ou irregulares, considerando o critério de MOHR-COULOMB. O coeficiente de segurança ou fator de segurança é definido pelos esforços atuantes e pela força de resistência ao cisalhamento. Quando talude perde a sua estabilização, acontecem os movimentos de massa. Vermes (1978) classifica esses eventos em:

- Quedas (Associados a Rochas);
- Escorregamento (Associado a Blocos);
- Expansões (Associados a rochas);
- Fluxos (Associados à rocha e/ou solo);
- Complexos (Como avalanches ou combinações de vários tipos de movimento);

Segundo Silva (2011), a análise de estabilidades de taludes tem por função prever a finalidade de prever o aumento de solicitações que o mesmo consegue resistir até o seu colapso. Deste modo, o fator de segurança do talude é dado pela razão das forças resistentes ao escorregamento e as resultantes das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento do maciço, sendo calculado de acordo com a equação 2.1 (FIORI ALBERTO PIO, 2009).

$$\theta F_s = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Atuantes}} \quad (2.1)$$

O fator de segurança é classificado segundo o valor obtido, a sua determinação através dos métodos de equilíbrio limite ou método dos elementos finitos. De acordo com Vargas 1989 pode ser calculada através da equação de Coulomb, a resistência de cisalhamento do solo apresenta dois componentes, coesão e atrito, como na equação 2.2.

$$Tf = c' + \sigma n * tg\varphi \quad (2.2)$$

Onde:

- $C'$  = Coesão;
- $\varphi$  = Ângulo de atrito;
- $\sigma$  = Tensão normal na superfície;

Segundo Silva (2011), uma base na análise de estabilidade de taludes é a Teoria do Equilíbrio Limite, que considera uma superfície planar, circular, poligonal ou mista. O uso dos métodos determinísticos convencionais que consideram os dados estimados para encontrar a melhor estimativa simples para os parâmetros. Essa análise apresenta um resultado único em que é considerada uma representação da realidade e os métodos probabilísticos consideram as incertezas nos parâmetros. As variáveis são consideradas aleatórias, podendo assumir qualquer valor em um intervalo.

Com o passar do tempo, surgiram os modelos determinísticos como Bishop, Spencer, Morgenstern-Price e Janbu, baseando-se no valor calculado, admite-se o fator de segurança, se for maior ou igual ao aceitável, o talude é considerado estável e seguro. Conforme definido na tabela 3.

Tabela 3 – Fator de segurança

| <b>Fator de Segurança</b> | <b>Estabilidade</b>   |
|---------------------------|-----------------------|
| FS < 1                    | Instável              |
| FS= 1                     | Equilíbrio Instável   |
| 1 < Fs < 1,5              | Estabilidade precária |
| Fs = 1,5                  | Estável               |

Fonte: Ulrich, 2019.

O Brasil não tem legislação vigente que regulamente a construção de projetos de pilhas de rejeito filtrado, nesse caso para o desenvolvimento dessas estruturas há uma mescla das normas existentes de barragens e pilhas de estéril, dessa forma os projetos são realizados seguindo as orientações dessas leis. A ABNT NBR 13029 descreve a construção de pilhas de rejeito que atendem às análises de estabilidade e fator de segurança, conforme demonstrado na tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de segurança propostos para taludes de rejeito de mineração.

| <b>Estruturas</b>             | <b>Fator de Segurança max/min</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Ruptura do talude geral       | 1,50/1,30                         |
| Ruptura do talude entre berma | 1,50/1,30                         |

Fonte: Adaptada A ABNT NBr 13029.

Considerando também a ABNT NBR 13028, que regulariza os fatores de segurança para a construção de barragens de rejeito e reservatório de água, Machado (2022) propôs uma tabela com os valores de fatores de segurança para a construção, expressados na tabela 5.

Tabela 5 – Fatores de segurança para pilhas de rejeito filtrado e compactado.

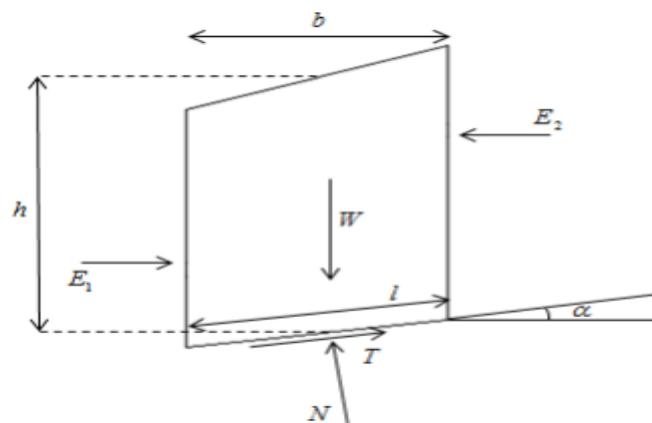
| <b>Fase de construção</b>            | <b>Talude</b>       | <b>Fator de Segurança mim</b> |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Superfície Freática normal           | Global/ Entre Berma | 1,50/1,50                     |
| Superfície Freática Crítica          | Global/ Entre Berma | 1,30/1,30                     |
| Solicitação Sísmica (Pseudoestática) | Global/ Entre Berma | 1,10/1,10                     |

Fonte: adaptado Machado 2022.

### 2.5.1 Método de Bishop Simplificado

Bishop (1955), apresenta soluções mais práticas para os métodos de análise através da divisão por fatias feita na estrutura do maciço. Onde o efeito das forças atuantes só é considerado até certo ponto, várias superfícies de ruptura são investigadas para encontrar o fator de segurança mínimo. (DAS; SOBHAN, 2014). Como representado na Figura 3 a distribuição das forças.

Figura 3: Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo.



Bishop analisa superfície de ruptura circular, considerando as forças na lateral das fatias horizontais, desprezando as forças tangenciais. O fator de segurança apresentado por bishop é calculado através da equação 2.3:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{n=p} (C' * bn + Wn * tg \varphi')}{\sum_{i=1}^{n=p} Wn * \sin \alpha n} \frac{1}{man} \quad (2.3)$$

Onde:

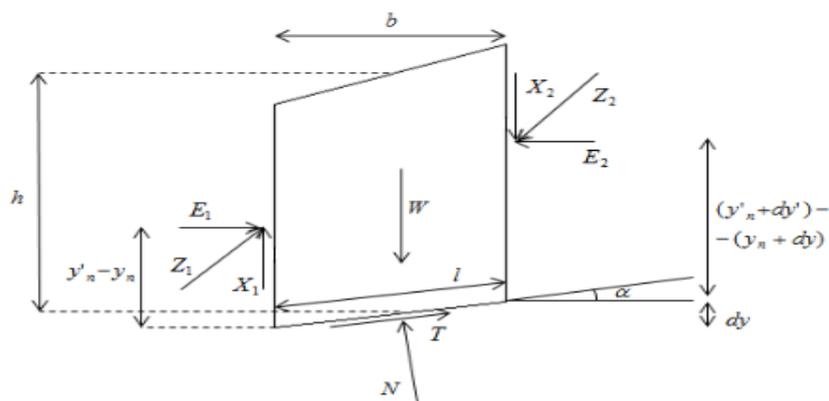
- $C'$  = Coesão do solo;
- $\varphi$  = Ângulo de atrito interno do solo;
- $\alpha$  = Inclinação que a fatia se encontra com a horizontal;
- $W$  = Peso da fatia
- $M$  = número de estabilidade;

O método fornecera uma solução após os processos iterativos, nos quais é arbitrado um valor de fator de segurança  $FS_i$ , repetido a estimativa até que o valor calculado  $FS$  se iguale ao valor arbitrado  $FS_i$ .

### 2.5.2 Método de Morgenstern – Price

Em 1965, Morgenstern e Price apresentaram um método de análise de estabilidade onde todos os parâmetros de resistência variáveis e com poropressão (ALVES, 1982). As forças que interagem entre as fatias são aproximadas por funções  $f(x)$  e multiplicadas por fatores adimensional  $\Lambda$ . (SILVA, 2011). Como é demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Método de Morgenstern-Price – Forças aplicadas a uma fatia de solo.



Contudo, Souza (2019) fala que outros pesquisadores perceberam que quando a função apresenta constância, o resultado tende a ser o mesmo do método de Spencer, e quando a função é nula, os valores se mostram iguais ao método de Bishop.

Conforme Souza (2019), o método é construído por equações de equilíbrio e as forças que atuam na fatia infinitesimal. O método de Morgenstern — Price acarreta que o

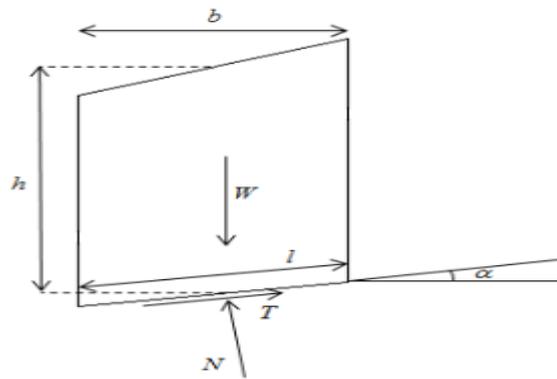
equilíbrio das forças seja verificado em cada fatia, eliminando a fatia superior na qual o equilíbrio não é considerado.

### 2.5.3 Janbu Simplificado

O método de Janbu desenvolvido em 1954, estuda a estabilidade de taludes considerando qualquer forma de superfície de ruptura. A análise é feita considerando equações diferenciais que definem o equilíbrio das forças e o momento de massa (FREITAS et al., 2011).

Com isso, Alves (1982) fala que o equilíbrio das forças é feito nas direções vertical e paralela à base da fatia, como é demonstrado na Figura 5.

Figura 5: Método de Janbu Simplificado – Forças aplicadas a uma fatia de solo.



A equação de equilíbrio de momentos é usada para solucionar as forças verticais entre as fatias, sendo obtido através do equilíbrio das forças e FS, atribui-se que as forças verticais entre as fatias sejam  $(X) = 0$  na primeira interação entre os valores, com as interações geram-se novos valores de  $X$  e de  $E$  até satisfazer as equações 2.4. A literatura fala que o método traz soluções em menos de 5 interações.

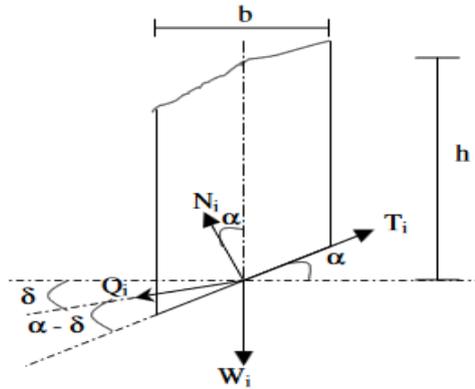
O fator de segurança é dado através da equação

$$Fs = \frac{1}{E_0 E n + \sum (W + (X x_{n+1} - x_n))} * \sum \{ [c' * \Delta x + (W + (x_{n+1} - x_n) - u * tg \varphi') * \frac{sec^2 \alpha}{1 + \frac{tg \alpha * tg \varphi}{fsi}}] \} \quad (2.4)$$

### 2.5.4 Método de Spencer

Em 1967, Spence mostrou um método de análise de estabilidades de taludes, considerando inicialmente superfícies circulares, as forças entre as fatias que fazem os ângulos  $\theta$  com a horizontal. Ele é considerado um método rigoroso por atender a todas as equações de equilíbrio e momentos. A Figura 6 demonstra as hipóteses sugeridas por Spence.

Figura 6: Foças atuantes na base da fatia pelo método de Spenser.



O valor é calculado para diferentes tipos de  $\theta$ , gerando três fatores de segurança:

- Considerando o equilíbrio de forças (F f)
- Considerando o equilíbrio de momentos (Fm)
- Considerando a direção das forças entre as fatias horizontal (Fmo)

O equilíbrio das forças atuantes nas fatias é dado através da expressão 2.5:

$$Q = \frac{\frac{c' * b * \sec \alpha}{F} + \frac{tg\phi' * (h \cos \alpha - u * b \sec \alpha)}{F} - W \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \delta) \left[ 1 + \frac{tg\phi(\alpha - \delta)}{F} \right]} \quad (2.5)$$

Os valores do fator de segurança variam conforme a mudança de  $\theta$ , a interseção das linhas fornece o fator de segurança satisfazendo ao equilíbrio de momentos e de forças. Os fatores de segurança adquiridos pelos métodos de Bishop simplificado e spencer apresentam valores próximos devido ao Fm não sofrer variações. (ALVES, 1982).

## 2.6 Modelagem Numérica/ Computacional

Segundo Aragão (2009), o Método de Equilíbrio Limite (MEL) traz um fator de segurança do talude através das propriedades de resistências, zonas de plastificação são muito utilizadas em projetos de taludes, contudo o MEL apresenta limitações, os modelos de falhas são muito simples, tirando a precisão.

O método do equilíbrio limite analisa se a resistência do maciço é suficiente para suportar as tensões a que é exposto o material. Torres (2022) fala que a modelagem numérica visa representar o comportamento do maciço em condições iniciais, resultando em situação de equilíbrio ou colapso.

São comumente realizadas a partir de Métodos dos Elementos Finitos (MEF) ou Métodos das Diferenças Finitas (MDF). Farjado (2014), que consistem em dividir a área de

estudo em discretizações, realizando aproximações numéricas das equações de equilíbrio. Embora não apresentem trajetórias de falhas, esses métodos destacam as regiões onde há concentração de tensões e deformações (ARAGÃO, 2009).

### 2.6.1 Métodos dos Elementos Finitos (MEF)

O método dos Elementos Finitos (MEF) abrange um conjunto de métodos numericamente ricos que buscam uma solução para problemas envolvendo equações diferenciais ordinárias e equações diferenciais parciais. Isso é feito através da divisão geométrica em elementos menores, conhecidos como elementos finitos (SILVA, 2013).

Para aplicação do método dos elementos finitos segundo Silva (2013), seguem-se os seguintes passos: idealização dos problemas físicos; formulação do modelo matemático; obtenção da solução e análise dos resultados. O método possui três enfoques de estudo, os quais são:

- Enfoque Físico: Aplica-se na área da mecânica dos sólidos, utiliza a análise estrutural;
- Enfoque Variacional: Possui um indicador variacional que descreve a energia do sistema;
- Enfoque Matemático: Equações obtidas pela aplicação dos métodos dos resíduos ponderados;

## 2.7 Estudos Teórico, Numéricos, Experimental

A Tabela 6 apresenta uma disposição de documentos selecionados, destacando a produção acadêmica relevante para a área de gestão e criação de pilhas de rejeito filtrado. Os estudos abrangem desde investigações teóricas até aplicações práticas, cada um contribuindo para o entendimento e aprimoramento das técnicas de empilhamento e estabilização de rejeitos.

Tabela 6 – Tabela de trabalhos correlatos.

| Autor/ Ano                          | Tipo de estudo/<br>Classificação | Título  | Objetivo Geral   |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|--|
| J. Lupo & J. Hall, (2010)           | Artigo                           | DRY STACK TAILINGS - DESIGN CONSIDERATIONS  | Descrever e analisar as condições de design do rejeito filtrado                              |
| Silva, João Paulo Moreira da (2011) | Dissertação de Pós-Graduação     | DESENVOLVIMENTO DE GEOMETRIA PARA EMPILHAMENTO DE REJEITOS DESAGUADOS DE MINÉRIO DE FERRO | Desenvolver uma geometria para empilhar o rejeito arenoso. Caracterizar o comportamento e os |

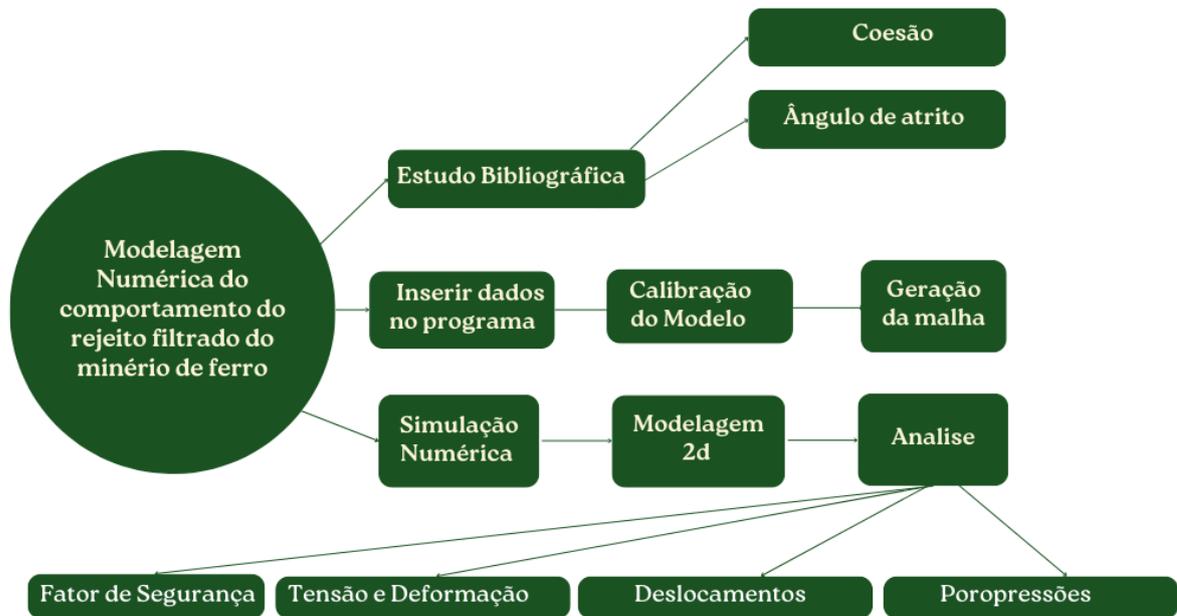
|                                       |                                      |  |   |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--|---|
|                                       |                                      |  | parâmetros geotécnicos dos materiais a serem utilizados nesta pesquisa.   |
| Silva, Everton Miranda da (2013)      | Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) | ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE POR MEIO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA: Método dos elementos finito        | Identificar o comportamento de um solo hipotético e as características de ruptura do mesmo por meio de um método convencional (método de Bishop) e por meio de simulação numérica utilizando o método dos elementos finitos em análise estrutural estática e dinâmica |
| C. Crystaal e C Hore SRK (2018)       | Artigo                               | FILTER RESSED DRY SSTACKING: DESING CONSIDERATIONS BASED ON PRACTICAL EXPERIENCE                     | Experiência e considerações práticas do uso de rejeito filtrado.  |
| Souza, Weber Anselmo dos Ramos (2020) | Dissertação de mestrado              | ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PILHAS DE REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO DURANTE A CONSTRUÇÃO | Avaliar a estabilidade de pilhas de rejeito filtrado e coadiposição por meio da análise de uma simulação numérica de tensão deformação-adensamento.   |
| Torres, Ana Clara dos Anjos (2022)    | Dissertação de mestrado              | MODELAGEM NUMÉRICA DE PILHA DE REJEITO FILTRADO REFORÇADA COM GEOGRELHA                              | Estudar soluções de reforço com geogrelha para empilhamento de rejeito filtrado por meio de análises baseadas em modelos numéricos  |

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado a partir de referências bibliográficas de estudos de estabilidade, em seguida foi desenvolvido em software de elementos finitos Slide 2D uma modelagem computacional com simulações numéricas e análises. Na Figura 7 é apresentado um fluxograma da metodologia do presente trabalho, dividido em tópicos principais: referências Bibliográficas, calibração do modelo e simulação numérica.

Figura 7 – Fluxograma do desenvolvimento da Metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

#### 3.1 Descrição do Problema

O presente trabalho estudará o comportamento do empilhamento de rejeito filtrado para diferentes alturas. Crystal et al. (2018) falam que pilhas com 100 m a 200 m apresentam estabilidades. Neste caso, serão adotados os seguintes parâmetros: altura de 150 m, coesão, ângulo de atrito e diferentes de fundação, e dois tipos de rejeito com diferentes teores de água, definidos como zona estrutural e não estrutural.

Para o desenvolvimento das fundações, serão utilizadas algumas orientações feitas por Pinto (2019), que ratificou uma calibração de modelos construtivos de pilhas de rejeito filtrado do minério de bauxita e paramentos de areia como alternativa de material para alicerces.

A análise será realizada para 3 situações diferentes com paramentos de fundações alterados para cada situação, como descrito na tabela 7.

Tabela 7 – Situações de Análise.

| Situações de análise | Fundação/ Espessura       | Rejeito                             |
|----------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Modelo 1             | Argila condensada – 2,5 m | Rejeito estrutural e não estrutural |
|                      | Argila amarela – 5 m      |                                     |
|                      | Argila variada – 27,5 m   |                                     |
| Modelo 2             | Argila condensada – 10m   | Rejeito estrutural e não estrutural |
|                      | Argila amarela – 10m      |                                     |
|                      | Argila variada – 15m      |                                     |
| Modelo 3             | Argila Variada – 10 m     | Rejeito estrutural e não estrutural |
|                      | Areia – 15 m              |                                     |

Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

### 3.2 Parâmetros dos materiais

Os parâmetros utilizados nesse trabalho para a fundação foram propostos por Pinto (2019) foi 3 tipos de argilas, segue nas tabelas 8,9 e 10.

Tabela 8 – Parâmetros de entrada para o modelo Cam-Clay Modificado

| Material                                     | Argila Amarela     |
|--|--------------------|
| <b>Tipo de drenagem</b>                      | Drenado            |
| <b><math>\gamma</math>(kN/m<sup>3</sup>)</b> | 17,70              |
| <b>E°</b>                                    | 1,28               |
| <b><math>\lambda</math></b>                  | 0,10               |
| <b>K</b>                                     | 0,017              |
| <b>V' ur</b>                                 | 0,2                |
| <b>Mcs</b>                                   | 1,32               |
| <b>K(m/s)</b>                                | 8,0e <sup>-8</sup> |
| <b>POP (kPa)</b>                             | 43                 |

Fonte: Pinto (2019) apud Torres (2022)

Tabela 9 – Parâmetros de entrada para o modelo de Morhr-Coulomb

| Material                                     | Argila Amarela     | Argila Variada      |
|--|--------------------|---------------------|
| <b>Tipo de drenagem</b>                      | Não Drenado        | Não Drenado         |
| <b><math>\gamma</math>(kN/m<sup>3</sup>)</b> | 17,70              | 18,40               |
| <b>E°</b>                                    | 1,28               | 0,90                |
| <b>Eoed (Kpa)</b>                            | 30.0000            | 100.000             |
| <b>V'</b>                                    | 0,495              | 0,495               |
| <b>Su (kPa)</b>                              | 60                 | 200                 |
| <b>K(m/s)</b>                                | 8,0e <sup>-8</sup> | 5,78e <sup>-8</sup> |

Fonte: Pinto (2019) apud Torres (2022)

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o modelo de Mohr-Coulomb.

| Material                      | Areia               |
|-------------------------------|---------------------|
| Tipo de drenagem              | Drenado             |
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 15,81               |
| E°                            | 0,90                |
| Eoed (Kpa)                    | 26,67e <sup>3</sup> |
| V'                            | 0,200               |
| Su (kPa)                      | 200                 |
| K(m/s)                        | 5,78e <sup>-8</sup> |

Fonte: Pinto (2019) apud Torres (2022).

Para a calibragem da modelagem dos rejeitos será considera os paramentos propostos por Torres (2022) que realizou os ensaios definindo dois tipos de rejeitos com porcentagem de sólidos diferentes, gerando duas zonas: uma estrutural e outro não estrutural, servindo de apoio, garantido o empilhamento. A construção da pilha seguirá o modelo de Hardening Soil com os dados apresentados na tabela. Com isso, é possível gerar as malhas de análise, conforme é descrito na tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada para o modelo Hardening Soil dos Rejeitos.

| Parâmetros Utilizados         | Rejeito Filtrado – Zona Estrutural | Rejeito Filtrado – Zona Não Estrutural |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| Tipo da drenagem              | Drained                            | Undrained B                            |
| $\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 18,00                              | 17,50                                  |
| E°                            | 0,7                                | 0,7                                    |
| E                             | 5.000                              | -                                      |
| E                             | 4.000                              | -                                      |
| E                             | 15.000                             | -                                      |
| Cc                            | -                                  | 0,4945                                 |
| Cs                            | -                                  | 0,09889                                |
| C'ref(kPa)                    | 15                                 | 15                                     |
| $\varphi$ (°)                 | 30                                 | 30                                     |
| K(m/s)                        | 5,00E-09                           | 5,00E-09                               |
| OCR                           | 1,00                               | 1,00                                   |

Fonte: Torres (2022).

### 3.3 Condições Iniciais

As Figuras 8 e 9 demonstram o layout e a malha gerada no software Plaxis 2D, onde foram desenvolvidos 3 modelos de análise com variações em suas fundações.

O modelo 1 estudado, trata-se de uma pilha com um esquema de fundação com espessuras de camadas de argila condensada com 2,5 metros, argila amarela com 5 metros e argila variada com 27,5, contendo os dois tipos de rejeitos com uma altura de 150 metros.

O modelo 2 contém os mesmos tipos de rejeito, mas com uma fundação com características de espessuras diferentes, com argila condensada de 10 metros, argila amarela com 10 metros e argila variada com 15 metros.

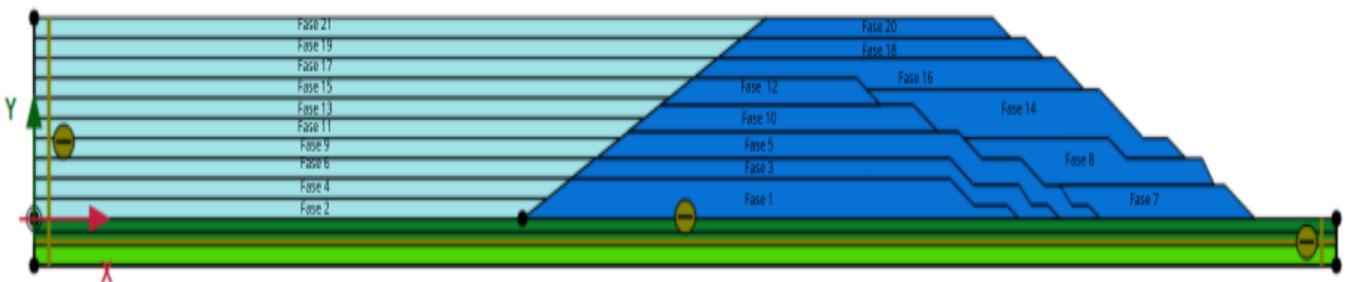
Modelo 3 apresenta as mesmas condições de rejeito, variando novamente as características da fundação, alterando as espessuras das camadas, com 10 metros de areia e 15 metros de argila variada.

A construção da pilha segue os determinados padrões de desenvolvimento, a zona estrutural com maior teor de sólido teve taludes a montante com 1V para 2H e os taludes a jusantes com a relação de 1V para 1,5V para o desenvolvimento da zona não estrutural, definiu-se que as camadas teriam uma espessura de 15 metros cada, tendo uma variação de tempo de construção de 200 a 500 dias. O erguimento da pilha foi subdividido em 21 fases, alternado entre zona estrutural e não estrutural.

Variações como a compactação e tráfego de veículos não foram consideradas para o processo de alteamento e nem os efeitos que tais causam na fundação da pilha. Contudo, ressalta-se a importância do dimensionamento desses elementos para a máxima eficiência da estrutura, isentando assim de furos, trincas ou porosidades que comprometam a estabilidade. (TORRES, 2022).

O modelo apresentado na Figura 8 foi baseado no estudo realizado por Torres (2022), que ilustra a configuração do empilhamento do rejeito filtrado e da fundação, sequenciado em 12 fases construtivas, com altura máxima de 35 metros. No entanto, o modelo proposto nesse estudo foi expandido, contemplando 21 etapas construtivas alternadas entre as fases não estruturais e estruturais. A fase não estrutural consiste em rejeito com baixa ou nenhuma compactação nos períodos chuvosos, enquanto a fase estrutural envolve o controle de compactação durante a estiagem, com altura máxima de 150 metros.

Figura 8 – Configuração de construção.

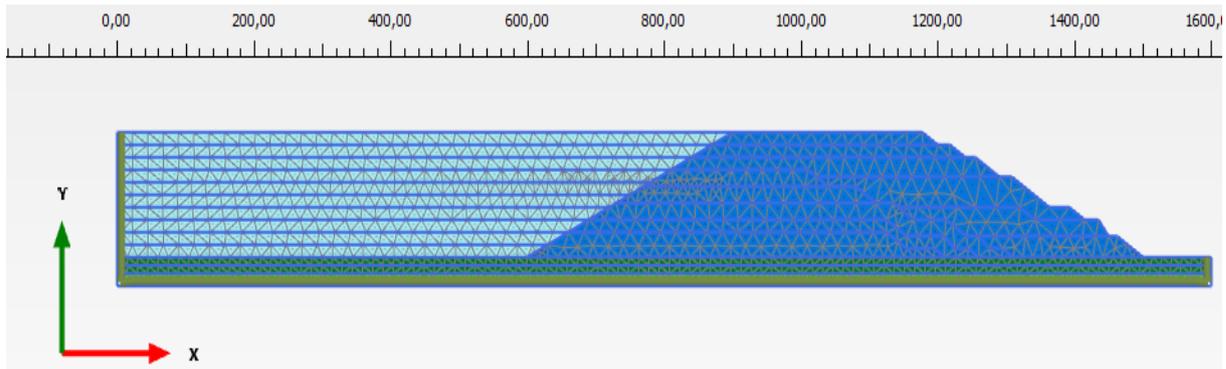


Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

Sendo a região azul-claro o rejeito não estrutural, a região azul-escuro o rejeito estrutural, e a fundação representada por tons de verde. A Figura 9 representa a malha de

elementos gerados pelo Plaxis 2D com elementos triangulares, contendo 3.482 elementos. As unidades padrão para as dimensões, forças e tempo utilizadas foram metro (m), quilonewton (kN) e dia. Ademais, os materiais da fundação seguem o critério de Cam-Clay modificado e Mohr-Coulomb, enquanto o empilhamento segue o modelo de Hardening.

Figura 9 – Malha de elementos finitos gerada pelo Plaxis 2D para pilha.



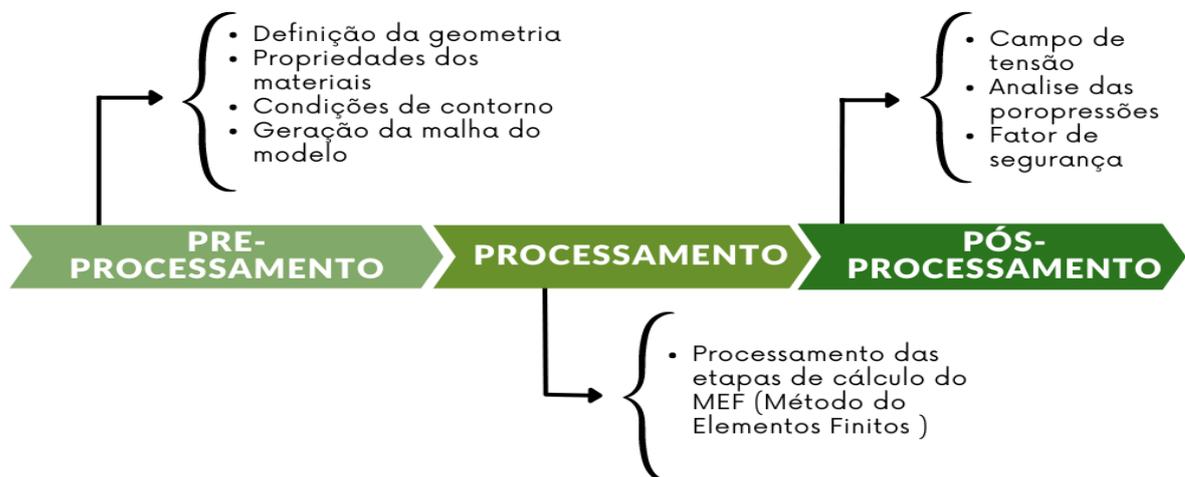
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.4 Calibração do modelo numérico

Para a simulação numérica do comportamento de pilhas de rejeito filtrado, foram analisados tensões, deformações, deslocamentos e percolações como apoio do software Slide 2D. As etapas da simulação serão conforme descritas na Figura 10.

O layout exposto na figura 8 foi incluído no Plaxis 2D, em todas as análises, o próprio software gerou automaticamente para todo os cenários as respectivas malhas, em seguida é inserido o lençol freático entre as camadas de argilas na fundação.

Figura 10 – Fluxograma das etapas de simulação numérica.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Na literatura, o fator de resistência é calculado conforme descrito na Equação 2.1. No entanto, no software Plaxis 2D, o fator de segurança é considerado como a razão entre a

resistência real e a resistência mínima necessária para o equilíbrio. Ao se introduzir a condição de Coulomb padrão, o fator de segurança será calculado utilizando a Equação 3.1.

$$FS = \frac{C - \sigma_n \tan \varphi}{c_r - \tan \varphi r} \quad (3.1)$$

Onde:

- $C$  e  $\varphi$  = parâmetros de resistência;
- $\sigma_n$  = componente de tensão normal real;

Os parâmetros  $c_r$  e  $\sigma_r$  são reduzidos o suficiente para garantir o equilíbrio. A metodologia descrita utiliza o método de A redução de Phi/c para calcular o fator de segurança global no software Plaxis. Nesse método, tanto a coesão quanto a tangente do ângulo de atrito são reduzidos proporcionalmente.

$$\frac{C}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi} = \Sigma Msf \quad (3.2)$$

A redução dos parâmetros de resistência é controlada pelo multiplicador  $\Sigma Msf$ , que aumenta gradualmente em um procedimento passo a passo até que ocorra a falha. Assim, o fator de segurança é definido como o valor de  $\Sigma Msf$  no momento da falha.

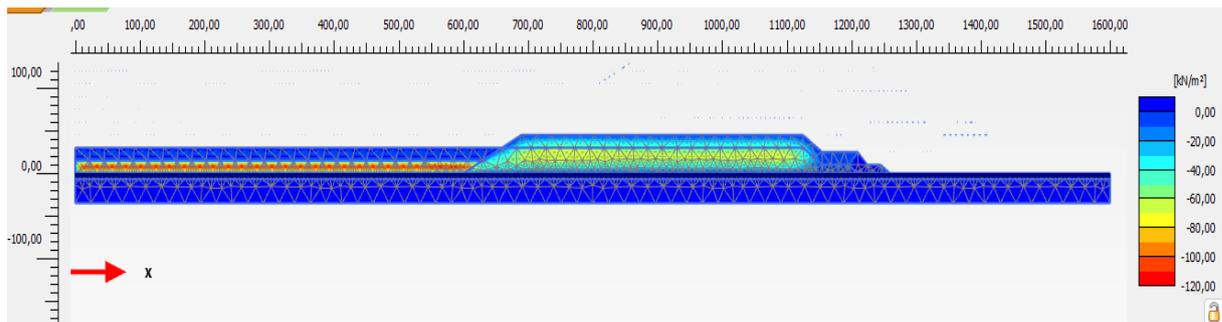
#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados devidamente adicionados no software obteve-se a análises dos fatores de segurança, poropressões e deformações do sistema para cada modelo estudado com altura máxima de 150 metros.

O modelo 1 é composto por uma fundação de argila condensada, argila amarela e argila variada, com as configurações de espessura respectivamente de 0 m a -2,5 metros, -2,5 m a -7 metros e -7 m a -27,5 metros. A altura do rejeito não estrutural é de 30 m, e a do rejeito estrutural, de 43,50 m.

Na Figura 11, observam-se as poropressões presentes no sistema. O software Plaxis 2D considera as poropressões como negativas. O prazo de construção foi de 500 dias, o que resultou em maiores índices, uma vez que o curto período para a deposição não foi suficiente para que ocorresse a dissipação dessas poropressões devido ao processo de alteamento.

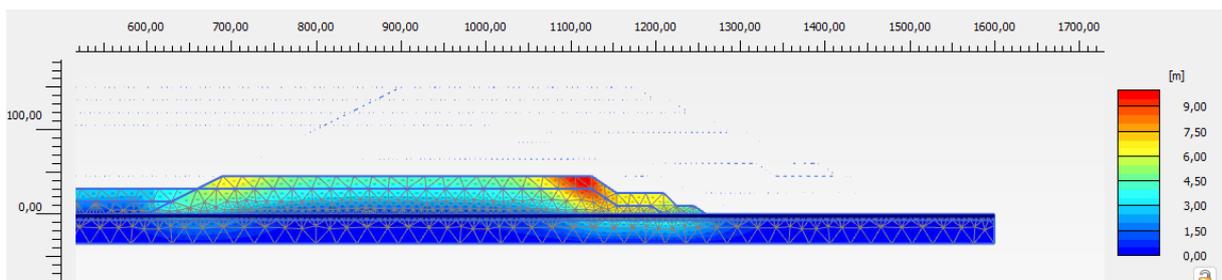
Figura 11: Poropressão da Modelo 1 para a fase de construção 4.

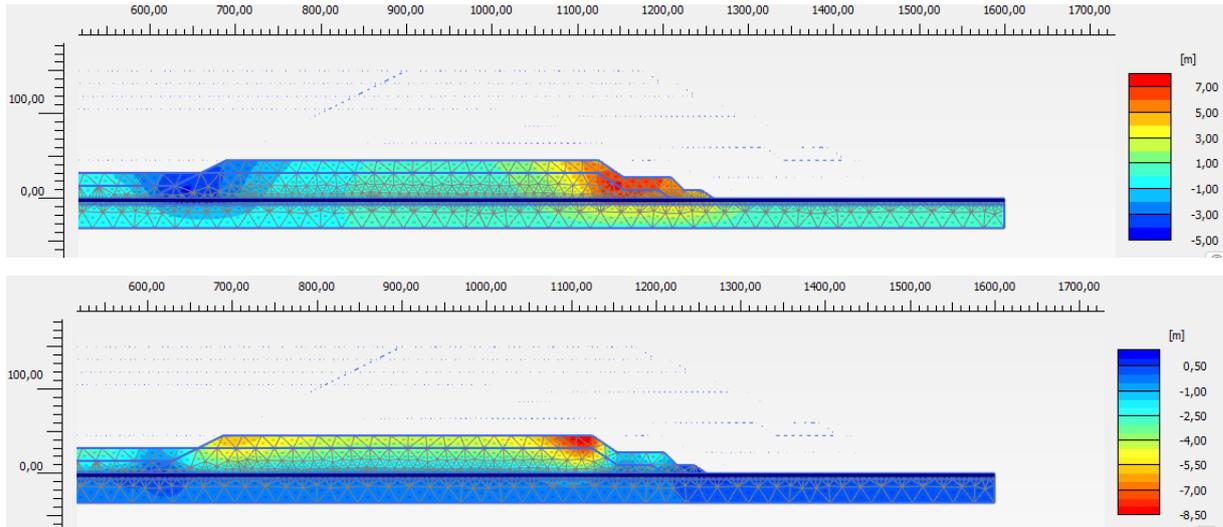


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 12 apresenta os deslocamentos da pilha formada pelo rejeito estrutural, indicando as áreas onde ocorrem os rompimentos. As regiões em cores mais intensas (cores quentes) destacam essas zonas de instabilidade para a fase de construção 4, enquanto as demais fases já se tornam inviáveis, uma vez que o colapso já ocorreu.

Figura 12: Deslocamentos do modelo 1 para a fase de construção 4. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y.

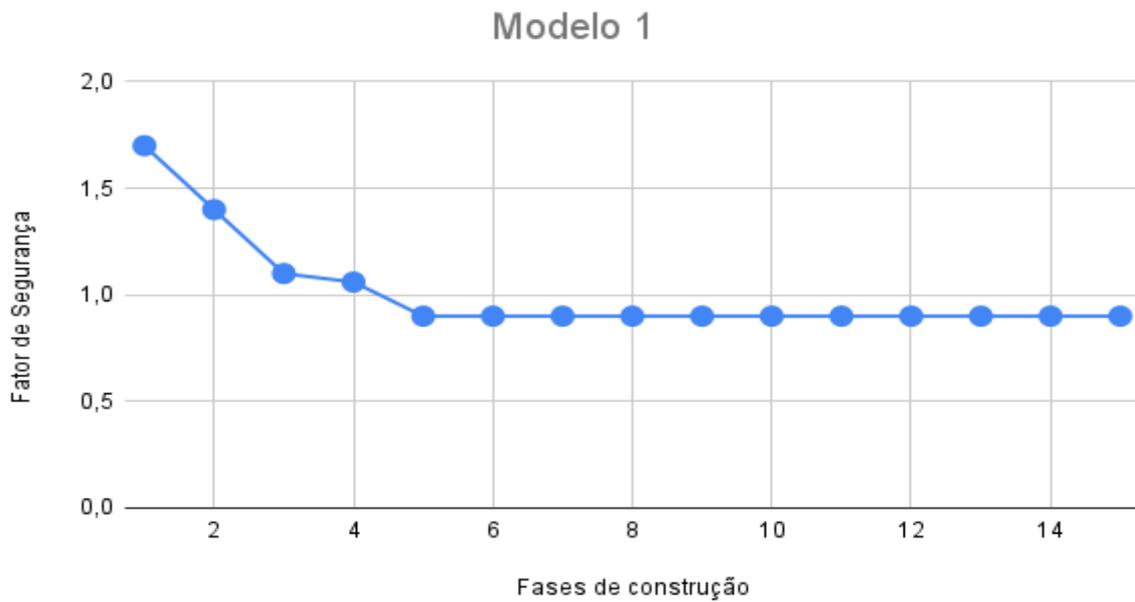




Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O modelo suporta até a fase de construção 4, tendo inicialmente um fator de segurança de 1,7, que decai ao longo das fases até chegar a 1,06 na fase 5, onde ocorre o rompimento do sistema.

Gráfico 1 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 1.

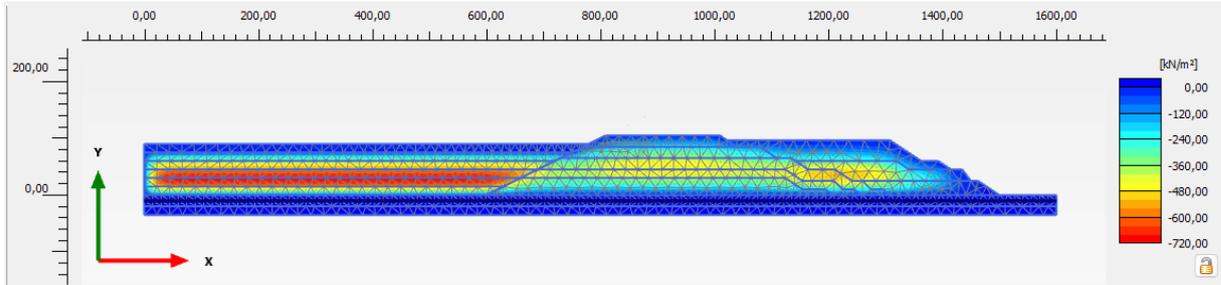


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O modelo 2 apresenta uma fundação de argila condensada e argila variada, com espessuras respectivamente de 0 m a -20 metros e de -20 m a -35 metros, além do rebaixamento do lençol freático para a camada condensada a -10 metros. As alturas dos rejeitos são de 90 m para o rejeito não estrutural e 105 m para o estrutural. O modelo suporta até a fase de construção 15, com o rompimento ocorrendo na fase 16

A Figura 13 ilustra as poropressões envolvidas no sistema até a fase de rompimento, apresentando valores mais elevados no rejeito não estrutural devido ao curto período de deposição. Esse fator também afeta o rejeito estrutural, não sendo suficiente para permitir a dissipação adequada das poropressões.

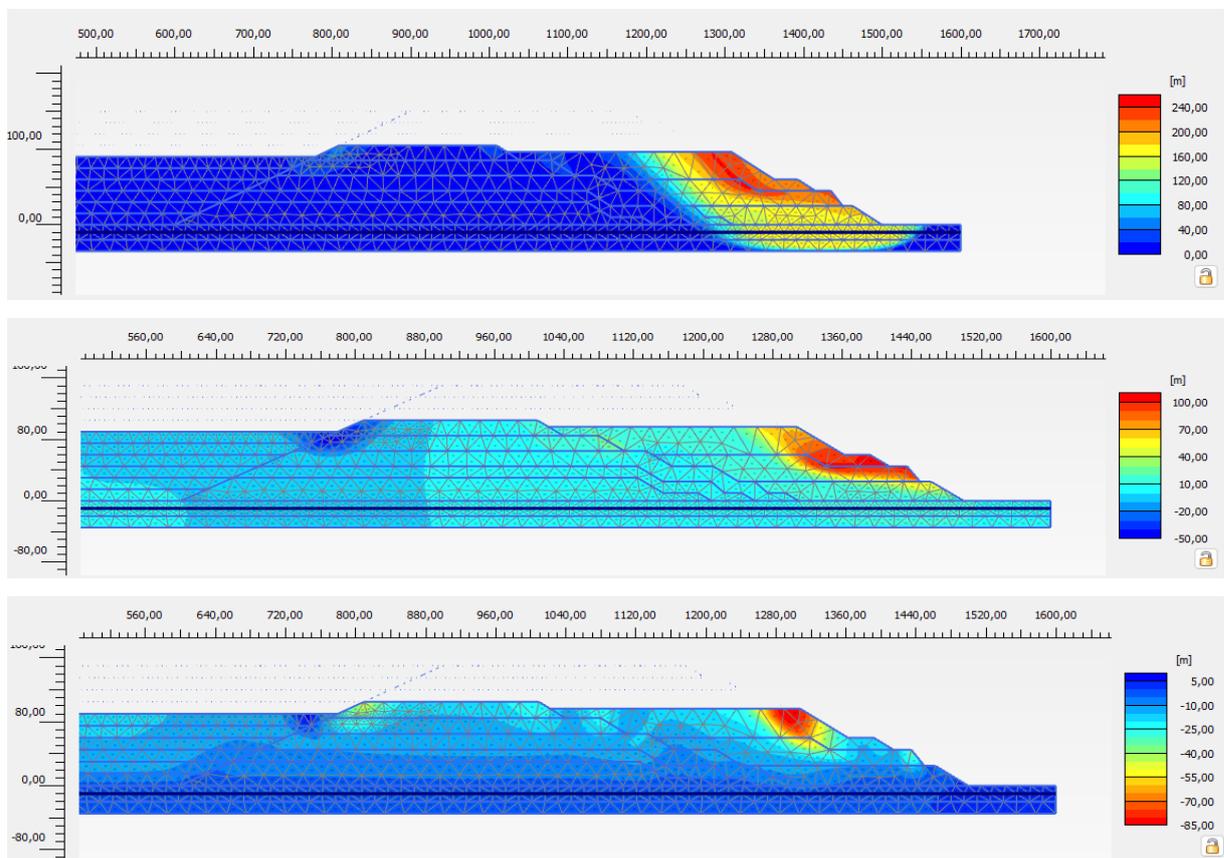
Figura 13: Poropressões do Modelo 2.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 14 mostra os deslocamentos da pilha formada pelo rejeito estrutural, indicando as áreas onde ocorrem os rompimentos. As regiões com cores mais intensas (cores quentes) destacam essas zonas de instabilidade na fase de construção 15. Acima dessa fase, ocorre o rompimento do sistema.

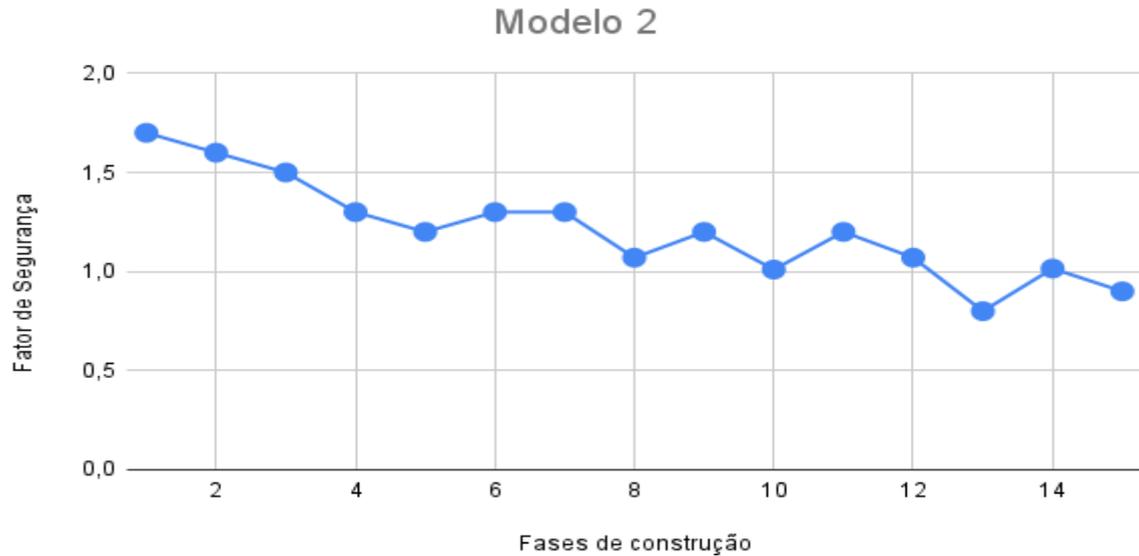
Figura 14: Deslocamentos do modelo 2 para a fase de construção 15. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Inicialmente, apresenta um fator de segurança de 1,6, que decai para 1,3 na fase 7, atingindo a falha com um valor de 0,9.

Gráfico 2 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 2.

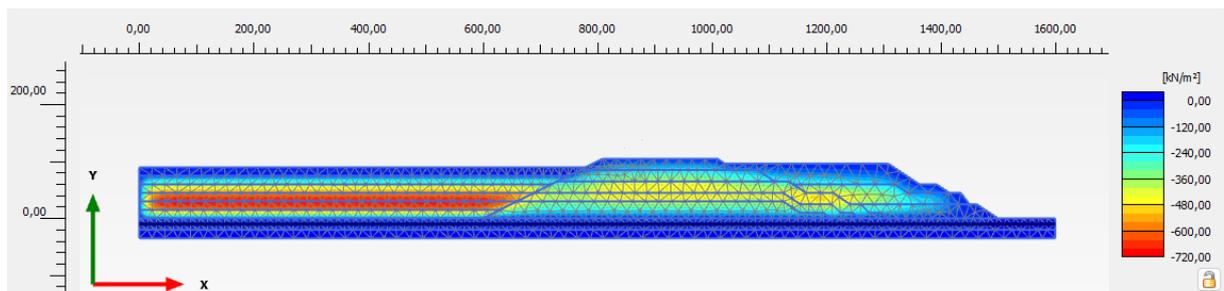


Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

O modelo 3 traz uma fundação de argila condensada e areia grossa, com duas camadas de areia grossa de espessuras de 0 m a -10 metros e de -10 m a -20 metros, e argila condensada de -20 m a -35 metros. O lençol freático se encontra entre a segunda camada de areia grossa e a argila condensada. O modelo atinge a fase de construção 16, com o rompimento ocorrendo na fase 17. As alturas dos rejeitos são de 90 m para o rejeito não estrutural e 120 m para o estrutural.

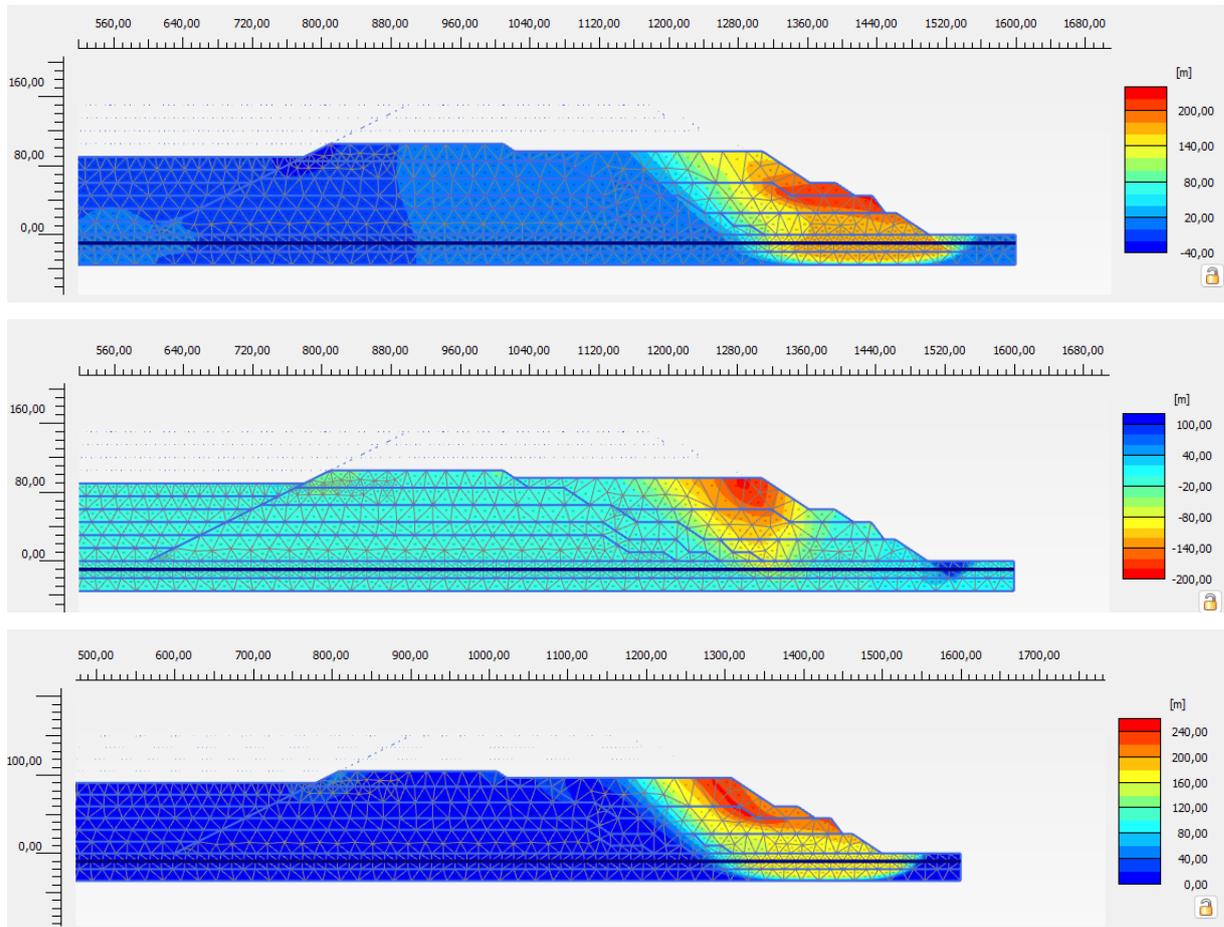
A demonstração das poropressões envolvidas no sistema está apresentada na Figura 15, onde se observa o mesmo comportamento dos modelos anteriores. A Figura 16, por sua vez, exibe a deformação do sistema após a falha, em três formas diferentes, considerando o módulo e os eixos x e y.

Figura 15: Poropressões do Modelo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

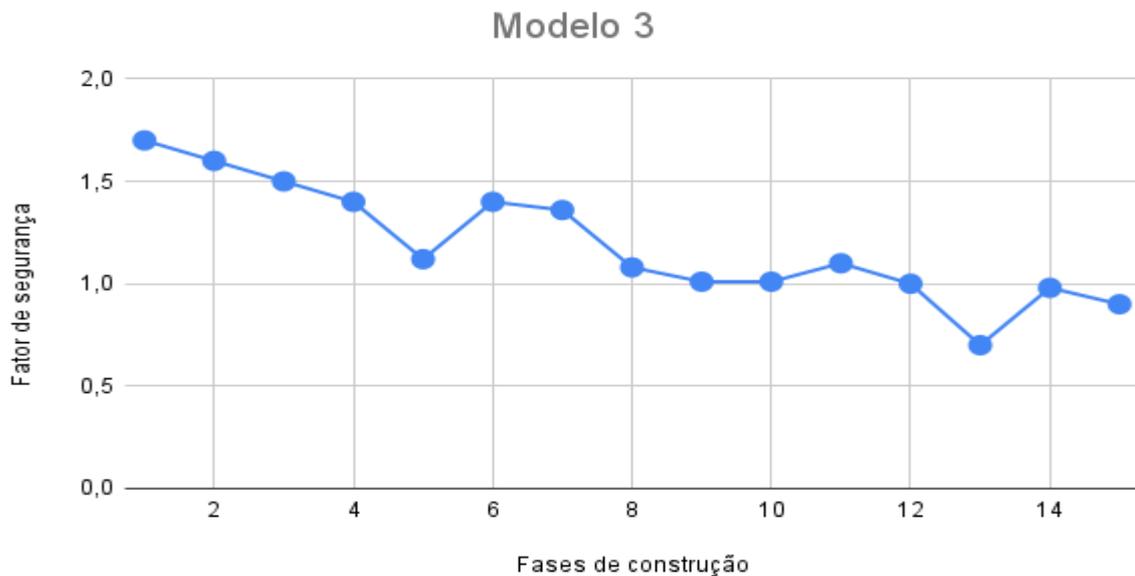
Figura 16: Deslocamentos do modelo 2 para a fase de construção 15. A) em modulo, B) no eixo X e C) no eixo Y.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

Inicialmente, o fator de segurança é de 1,6, decaindo para 1,5 na fase 9 de construção, 1 na fase 14, e chegando a 0,9 na fase 17, quando ocorre o rompimento da estrutura.

Gráfico 3 – Fatores de segurança para a análise de estabilidade modelo 3.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

As análises realizadas indicaram que, considerando as configurações de fundação, os parâmetros de entrada e a altura de 150 metros, a pilha não apresenta viabilidade para a construção, pois não demonstrou a estabilidade necessária. Uma etapa crucial no processo de construção de pilhas é a fundação, pois as alterações feitas nessa fase aumentaram o fator de segurança inicial e o de ruptura como é demonstrado na tabela 11.

Tabela 11 – Fatores de segurança.

| Situações de análise | FS Inicial | FS Fase de Ruptura |
|----------------------|------------|--------------------|
| Modelo 1             | 1,5        | 1,06               |
| Modelo 2             | 1,6        | 0,9                |
| Modelo 3             | 1,7        | 0,9                |

Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

A configuração escolhida para a construção do modelo requer a presença dos dois tipos de rejeitos, pois eles desempenham a função de contrapeso um para o outro. A construção de uma pilha apenas com o rejeito estrutural não apresentou estabilidade, levando ao rompimento na primeira fase de construção.

Por meio da modelagem numérica, foram determinadas as alturas máximas que cada rejeito pode atingir antes da ruptura do sistema. A tabela 12 mostra esses valores, e, conforme evidenciado, o modelo 3 apresenta viabilidade estrutural até a fase de construção 16, alcançando uma altura de 120 metros para o rejeito estrutural e 90 metros o rejeito não estrutural.

Tabela 12 – Situações de Análise.

| Situações de análise | Altura máxima não estrutural | Altura máxima estrutural |
|----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Modelo 1             | 30m                          | 43,50                    |
| Modelo 2             | 90m                          | 105                      |
| Modelo 3             | 90m                          | 120m                     |

Fonte: Elaborado pelo autor. (2024).

Contudo, observa-se que os modelos atendem às especificações das normas vigentes, apresentando viabilidade de construção apenas até a fase 4, com um fator de segurança de 1,5. As fases subsequentes não estão em conformidade com a norma, tornando-as inviáveis. O software Plaxis considerou que a ruptura do sistema ocorreria para um fator de segurança de 1; valores abaixo desse limite indicam a possibilidade de colapso.

## 5 CONCLUSÃO

Com o estudo desenvolvido, observa-se que a fundação tem grande influência na estabilidade das estruturas de empilhamento de rejeitos filtrados, pois as alterações nos parâmetros resultaram em um aumento nos fatores de segurança iniciais. À medida que o alteamento da pilha é realizado, esses valores vão se alterando. O período de construção de cada etapa também apresenta grande relevância para o sistema, pois influencia diretamente a consolidação das fases, impactando assim os fatores de resistência.

A altura é um fator crítico para a sustentação do sistema; quanto maior a altura, maiores são as forças atuantes. Isso exerce grande influência sobre parâmetros como poropressões, tensões, deformações e fator de segurança. Com base nos resultados, nota-se que, para os parâmetros utilizados neste trabalho, o empilhamento de rejeitos filtrados a uma altura de 150 metros não apresenta viabilidade estrutural.

O modelo 3 apresentou os melhores resultados, alcançando 120 metros de altura para o rejeito estrutural e 90 metros para o rejeito não estrutural antes da ruptura. No entanto, para atender ao fator de segurança adequado, a altura máxima recomendada é de 105 metros para o rejeito estrutural e 90 metros para o rejeito não estrutural.

Os modelos 1 e 2, para grandes taxas de alteamentos, não apresentaram viabilidade estrutural. Para atender ao fator de segurança adequado, no modelo 1 a altura máxima permitida é de 40 metros para o rejeito estrutural e 25 metros para o não estrutural. Já no modelo 2, as alturas são de 90 metros para o rejeito estrutural e 80 metros para o rejeito não estrutural.

A análise numérica que o tempo de construção das pilhas e a velocidade de alteamento também são fatores importantes, pois influenciam na dissipação das poropressões, impactando diretamente na estabilidade do sistema. Em todos os modelos, as poropressões de Lisboa não dissipadas, devido ao curto prazo de construção, contribuíram para a instabilidade e eventual colapso das pilhas.

Os resultados sugerem que, para projetos de pilhas de rejeito filtrado, é essencial considerar as condições da fundação, a composição e compactação dos rejeitos, além de planejar cuidadosamente o tempo de alteamento. O estudo reforça a importância de práticas de engenharia que priorizem a segurança, ajustando as condições da fundação e utilizando estratégias como reforço com geossintéticos para melhorar a estabilidade em alturas maiores.

**Sugestões para pesquisas futuras**

Como recomendações para trabalhos futuros, a realização de novas análises com alterações nas geometrias e parâmetros de material, como os descritos abaixo, seria de suma importância para se obter resultados promissores e completos para a construção de pilhas de rejeito filtrado.

- a) Adição de geossintéticos na fundação para analisar se melhoraria a estabilidade para pilhas de mais de 100 metros de altura;
- b) Alteração na geometria;
- c) Alteração nos parâmetros de entrada dos rejeitos;
- d) Analisar somente com um tipo de rejeito;

## REFERÊNCIAS

- AGUILERA, C. E. T. **Aplicação de métodos de análise de estabilidade de taludes de grande altura em mineração**. 2010. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC – Rio de Janeiro – RJ, 2010.
- ALVES, M. C. M.. **Estudo da estabilidade de valas escoradas por equilíbrio-limite e pelo método dos elementos finitos**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982.
- ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. 2008**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **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, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **ABNT NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilhas — Requisitos**, Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BARBOSA, C. V. **Análise de estabilidade tridimensional e bidimensional em uma pilha de rejeito filtrado de grandes dimensões**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.
- BOCCAMINO, G. D. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro: estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- BRASIL. **Lei Nº 12.334/10** de 20 de setembro de 2010, que estabelece a política nacional de segurança de barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. **Lei Nº14.066/20** de 30 de setembro de 2022. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Brasília, DF, 2022.
- COSTA, E. A. **Avaliação de Ameaças e Risco Geotécnico Aplicados à Estabilidade de Taludes**. 2005., Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre
- CRYSTAL, C.; HORE, C.; EZAMA, I. Filter-pressed dry stacking: design considerations based on practical experience. In: **Proceedings of Tailings and Mine Waste**. 2018.

- DANTAS, A. A. N. **Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários**. 2019. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. Fundamentos de engenharia geotécnica. 2007.
- DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings: the fundamentals. 2011. . **Proceedings Tailings and Mine Waste**, Vancouver: University of British Columbia, 2011. p. 1-9.
- DA SILVA, J. P. M.. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. 2011. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.
- ESPOSITO, T.J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construída por Aterro Hidráulico**. 2000. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 2000.
- FAJARDO, R. I. C.; R., C. (orientador) **Previsão numérica do comportamento dinâmico da barragem de Brapampa no Peru**. Rio de Janeiro, 2014. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.
- FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2016.
- FREITAS, Marco António Coelho et al. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia. 2011. Mestrado Integrado em Engenharia Civil- Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.
- FREITAS, João Luis Ferrás et al. Análise de estabilidade de taludes pelo método de Janbu e Spencer 2012. Mestrado em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.
- GUIMARÃES, Nilton Caixeta et al. **Filtragem de rejeito de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- LEONIDA, Carly. How to make filtered tailings feasible. **Engineering and Mining Journal**, [S.l.], v. 221, n. 5, p. 42-47, 2020.
- LUPO, J.; HALL, J. Dry stack tailings—design considerations. In: **Proceedings Fourteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado, USA, AA Balkema, The Netherlands**. 2010. p. 327-334.
- LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. Em: Tratamento de minérios, 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.1.

LUZ, AV; S., D; A., **SLM Tratamento de Minérios**, v. 4, p. 3-16, 2018. Tratamento de minérios. 4.ed.rev.amp. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 867p.

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

NUNES, D. d. R.. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

PRESOTTI, E. d. S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2002.

REIS, F. M. P. **Aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para análise da condição de estabilidade de taludes de mina: redes neurais artificiais**. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SANTOS, R. C. d. V. Contribuição do setor mineral no produto interno bruto brasileiro. **Radar**, [S.l.], n.65, 2021, p. 33-36.

SILVA, E. M.. **Análise de estabilidade de talude por meio de simulação numérica: elementos finitos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2013.

SCHOENBERGER, E.. Mineração ambientalmente sustentável: o caso das instalações de armazenamento de rejeitos. **Política de Recursos**, v. 49, p. 1 119-128, 2016

SOUZA, G. d O. **Análise comparativa entre métodos de análise de estabilidade de taludes**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

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

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

TORRES, A, C. A. **Modelagem numérica de pilha de rejeito filtrado reforçada com geogrelha**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

ULRICH, B. Practical thoughts regarding filtered tailings. In: **Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings**. Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 71-79.

ULRICH, B.; COFFIN, J. Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings. In: **Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 201-210.

VILCAHUAMAN, P. J. P. **Análise numérica do potencial de liquefação induzido por terremoto em uma barragem de rejeito no Peru**. 2018. Programa em Engenharia Civil, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.