



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DIMENSIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL:  
ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DE FOSFATO – TAPIRA (MG)**

**Júlia Nunes Castro**

**MONOGRAFIA nº 417**

Ouro Preto, Janeiro de 2022



**DIMENSIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE  
ESTÉRIL: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DE FOSFATO  
– TAPIRA (MG)**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. MSc. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 417**

## **DIMENSIONAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DE FOSFATO – TAPIRA (MG)**

**Júlia Nunes Castro**

*Orientador*

**Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/1.

**OURO PRETO**

**2022**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Júlia Nunes Castro

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

C355d Castro, Julia Nunes.

Dimensionamento e classificação de pilha de estéril [manuscrito]:  
estudo de caso em uma mina de fosfato - Tapira (MG). / Julia Nunes  
Castro. - 2022.  
79 f. (Série: 417)

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Minas e recursos minerais - Pilha de estéril. 2. Geotecnia. 3.  
Estabilidade - Análise. I. Lana, Cláudio Eduardo. II. Universidade Federal  
de Ouro Preto. III. Dimensionamento e classificação de pilha de estéril:  
estudo de caso em uma mina de fosfato - Tapira (MG).

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Nunes Castro

### Dimensionamento e classificação de pilha de estéril: estudo de caso em uma mina de fosfato - Tapira (MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Dimensionamento e classificação de pilha de estéril: estudo de caso em uma mina de fosfato - Tapira (MG)

Aprovada em 06 de janeiro de 2022

#### Membros da banca

Doutor - Cláudio Eduardo Lana- Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Mestre - Edison Tazava (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Doutor - Lucas Pereira Leão (Universidade Federal de Ouro Preto) Nome da instituição por extenso)

Cláudio Eduardo Lana - orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Eduardo Lana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/01/2022, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0268122** e o código CRC **2E90CB84**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.000495/2022-88

SEI nº 0268122

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br



## Agradecimentos

---

Agradeço aos meus pais, Evanilda e Roberto, por estarem sempre ao meu lado e me ensinarem a fazer o meu melhor, por me apoiarem nas minhas decisões e fazerem de tudo para realizar os meus sonhos. À minha irmã, Marcela, pelo apoio e por sempre estar presente em todos os momentos. Ao Leonardo, pelo companheirismo, carinho e pelo grande incentivo durante este trabalho.

Aos meus amigos e familiares de Itabira, agradeço por estarem comigo durante toda a caminhada, desde a escolha do curso e da universidade até o ingresso e conclusão deste. Aos amigos de Belo Horizonte, obrigada por me auxiliarem durante todos esses anos, por serem acolhedores e pelo suporte em todas as minhas mudanças. Aos amigos de Ouro Preto e da Geologia do período 2016.1, agradeço por todos os momentos únicos, pelas viagens, pelos trabalhos de campo e por fazerem essa jornada possível.

À entidade Geoconsultoria Junior, pelos grandes ensinamentos pessoais que pude desenvolver desde que entrei, pelo meu crescimento profissional a partir da atuação em projetos e no gerenciamento da empresa. Aos colegas da empresa júnior, obrigada por todo conhecimento compartilhado e por se tornarem grandes amigos.

À empresa Mosaic Fertilizantes, por ter oferecido a primeira oportunidade de experiência profissional, pelo enorme crescimento pessoal que adquiri durante o período de estágio e pelo desenvolvimento do conhecimento técnico e prático na área da Geologia. Ao André Santos, Raphael Soares e Luís Almeida, por apoiarem este trabalho e tornarem possível a concretização deste.

À Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas, ao Departamento de Geologia e aos professores que sempre nos ajudaram, por disponibilizarem e compartilharem o conhecimento com seus alunos e pelo ensino público de qualidade. Em especial ao professor Cláudio Lana por sempre estar disponível para ajudar e auxiliar constantemente na coordenação deste trabalho.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>xv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xix</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA .....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS .....	4
1.5.1 Revisão bibliográfica .....	4
1.5.2 Estudo de caso .....	4
1.5.3 Integração das informações .....	5
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	7
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	7
2.1.1 Província Tocantins .....	7
2.1.2 A Faixa Brasília .....	9
2.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	10
2.3 GEOLOGIA LOCAL .....	13
3 REVISÃO DA LITERATURA .....	15
3.1 INTRODUÇÃO.....	15
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL .....	15
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DAS PILHAS .....	16
3.3.1 Ficha técnica da pilha .....	17
3.3.2 Estudos.....	17
3.3.3 Projeto da pilha de estéril .....	18
3.3.4 Documentos anexados ao projeto .....	20
3.3.5 Fluxograma.....	21
3.4 PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO .....	21
3.4.1 Preparação da fundação .....	23
3.4.2 Sistema de drenagem .....	23
3.4.3 Métodos construtivos.....	24

3.4.4 Instrumentação .....	25
3.4.5 Operação.....	26
3.5 MONITORAMENTO DA PILHA .....	26
4 ESTUDO DE CASO .....	31
4.1 INTRODUÇÃO .....	31
4.2 CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL.....	32
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DA PILHA .....	32
4.3.1 Ficha técnica da pilha.....	32
4.3.2 Estudos.....	33
4.4 PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO.....	36
4.4.1 Preparação da fundação.....	37
4.4.2 Sistema de drenagem.....	37
4.4.3 Método construtivo .....	38
4.5 MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE PILHA .....	40
4.5.1 Monitoramento visual .....	41
4.5.2 Monitoramento por instrumentos .....	43
5 SUGESTÕES PARA OTIMIZAÇÃO DA PILHA T6 .....	45
5.1 INTRODUÇÃO .....	45
5.2 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE PILHA.....	45
5.2.1 Avaliação de estabilidade da pilha.....	45
5.2.2 Classes de estabilidade da pilha .....	48
5.2.3 Verificação do enquadramento da classe .....	49
5.3 MEDIDORES DE DESLOCAMENTO DE SUPERFÍCIE .....	50
5.4 ANÁLISE GEOTÉCNICA.....	50
5.5 FATOR DE SEGURANÇA.....	51
6 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

## INDÍCE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> - Mapa de localização da área de estudo e seus respectivos posicionamentos em relação ao estado de Minas Gerais .....	2
<b>Figura 1.2</b> - Mapa das vias de acesso para a cidade de Tapira a partir de Belo Horizonte ..	3
<b>Figura 2.1</b> - Mapa das províncias estruturais do Brasil .....	7
<b>Figura 2.2</b> - Mapa da Província Tocantins .....	8
<b>Figura 2.3</b> - Mapa da situação da área de estudo em relação à Província Tocantins .....	9
<b>Figura 2.4</b> - Mapa geológico da porção sul da Faixa Brasília, destacando-se as principais unidades dos compartimentos interno e externo. ....	10
<b>Figura 2.5</b> - Mapa geológico da região de estudo. A área está ilustrada pelo polígono bordejado em vermelho .....	12
<b>Figura 2.6</b> - Identificação dos horizontes presentes na Frente 2 (lavra) e seção esquemática dos horizontes presentes no Complexo de Mineração de Tapira .....	13
<b>Figura 3.1</b> - Os tipos de pilhas de estéril .....	16
<b>Figura 3.2</b> - Fluxograma esquemático acerca das etapas paa implementação da pilha.....	21
<b>Figura 3.3</b> - Fluxograma esquemático acerca dos procedimentos para implementação da pilha.....	22
<b>Figura 3.4</b> - Método construtivo ascendente por camada.....	24
<b>Figura 3.5</b> - Método construtivo descendente.....	25
<b>Figura 4.1</b> - Mapa de localização da Pilha de Disposição de Titânio – PDT T6 da empresa Mosaic Fertilizantes .....	31
<b>Figura 4.2</b> – Mapa de localização das três alternativas estudadas para o projeto PDT T6 da empresa Mosaic Fertilizantes no Complexo de Mineração de Tapira .....	34
<b>Figura 4.3</b> - Análise de estabilidade realizada na seção crítica da Alternativa 1 utilizando-se o programa Slide .....	35
<b>Figura 4.4</b> - Fluxograma referente as etapas do sequenciamento construtivo do Projeto de Disposição de Titânio – T6 .....	39
<b>Figura 4.5</b> - Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando a geometria do maciço.....	41
<b>Figura 4.6</b> - Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando o acúmulo de água na superfície da berma.....	42
<b>Figura 4.7</b> - Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando o processo erosivo nos taludes. ....	42



## ÍNDICE DE QUADROS

---

<b>Quadro 3.1</b> - Fator de segurança de acordo com os métodos de obtenção de vazão. ....	19
<b>Quadro 3.2</b> - Fatores de segurança da ruptura do talude geral e do talude entre bermas....	20
<b>Quadro 4.1</b> - Valores do coeficiente de escoamento superficial de acordo com a tipologia de uso e ocupação do solo. ....	36
<b>Quadro 5.1</b> - Primeiro quadro de pontuação do Sistema de classificação de pilhas de estéreis aplicado na avaliação da estabilidade da pilha.....	46
<b>Quadro 5.2</b> - Segundo quadro de pontuação do Sistema de classificação de pilhas de estéreis aplicado na avaliação da estabilidade da pilha.....	47
<b>Quadro 5.3</b> - Quadro de Classificação da Estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado aplicado na avaliação da estabilidade.....	48
<b>Quadro 5.4</b> - Quadro de Monitoramento instrumental e inspeções aplicado na avaliação da estabilidade da pilha.....	49



## Resumo

---

A geração dos materiais de estéreis em uma mineração requer constantemente a construção de pilhas de estéril para atender o armazenamento seguro desse material. Tais pilhas podem ser caracterizadas como aterros e são constituídas pelos elementos do estéril ou outros materiais, construídos em locais próximos do empreendimento ou das áreas de lavra e são dispostos simultaneamente com a atividade de mineração. No Brasil, para a elaboração de um projeto de disposição em pilha é necessário seguir a norma, recentemente revisada ABNT NBR 13029:2017. Esta norma especifica os requisitos mínimos para a construção de pilha de estéril gerado por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea, com objetivo de atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, minimizando assim, os impactos ao meio ambiente. A metodologia deste trabalho contemplou a realização de uma revisão da literatura quanto as pilhas de estéreis e uma análise referente ao desenvolvimento das etapas construtivas de uma pilha de titânio, que segue os mesmos requisitos do material estéril, abordando a classificação de pilhas, a descrição dos procedimentos necessários para a implementação do empreendimento e pontuar as formas de monitoramento de estabilidade das mesmas. Apresenta-se o estudo de caso da construção de uma pilha de titânio da empresa Mosaic Fertilizantes da unidade de Tapira (MG), com intuito de abordar as principais etapas do dimensionamento realizado e a construção da pilha, destacando a escolha do modelo construtivo, capacidade de armazenamento, características geométricas e as técnicas de monitoramento de estabilidade. Através da compilação das informações revisadas na literatura e dos dados analisados no estudo de caso, obteve-se, como resultado, a apresentação de alternativas de otimização na elaboração e supervisão da pilha de titânio utilizada no estudo de caso.

**Palavras-chave:** Disposição de pilhas de estéril, Geotecnia, Dimensionamento e classificação de pilha, Monitoramento, Análise de estabilidade.



## Abstract

---

The generation of mining waste rock constantly requires the construction of a mining waste rock piles to fit the safe storage of this material. These piles can be characterized as landfills and are consisted by the nature of the mining waste rock material, built in places close to the developments or mining areas and are arranged simultaneously with the mining activity. In Brazil, for the preparation of a project of disposal of mining waste piles, it is necessary to follow the recently revised standard ABNT NBR 13029:2017. This standard specifies the minimum requirements for the construction of a pile of mining waste rock generated by the mining of an open pit or underground mine, which aims to meet the conditions of safety, operation, economy and deactivation, minimizing impacts on the environment. The purpose of this work is to analyze the development of the constructive steps of a mining waste rock pile, considering the classification of piles, the description of the necessary procedures for the implementation of the project and punctuating the forms of monitoring its stability. It is presented the case study of the construction of a mining waste rock pile by the Mosaic Fertilizantes company at the Tapira (MG) unit, in order to address the main stages of sizing and construction of the pile, highlighting the choice of the constructive model, the tests and geotechnical parameters, storage capacity, geometric characteristics and stability monitoring techniques. Another perspective in this work is to investigate suggestions for optimizing the elaboration and supervision of the pile used in the case study.

**Key words:** Disposal of waste piles, Geotechnics, Sizing and classification of waste piles, Monitoring, Stability analysis.



### 1.1 APRESENTAÇÃO

O material denominado estéril é o produto da atividade de uma mineração que não apresenta teor de minerais que sejam aproveitados economicamente, ou seja, o teor de corte desse material é baixo. Existem dois tipos de resíduos a partir da operação de uma mina, os produtos estéreis, gerados a partir do decapeamento da mina e ficam geralmente expostos em pilhas, e o rejeito, sendo esses produtos resultantes do processo de beneficiamento do minério (Silva *et al.* 2012).

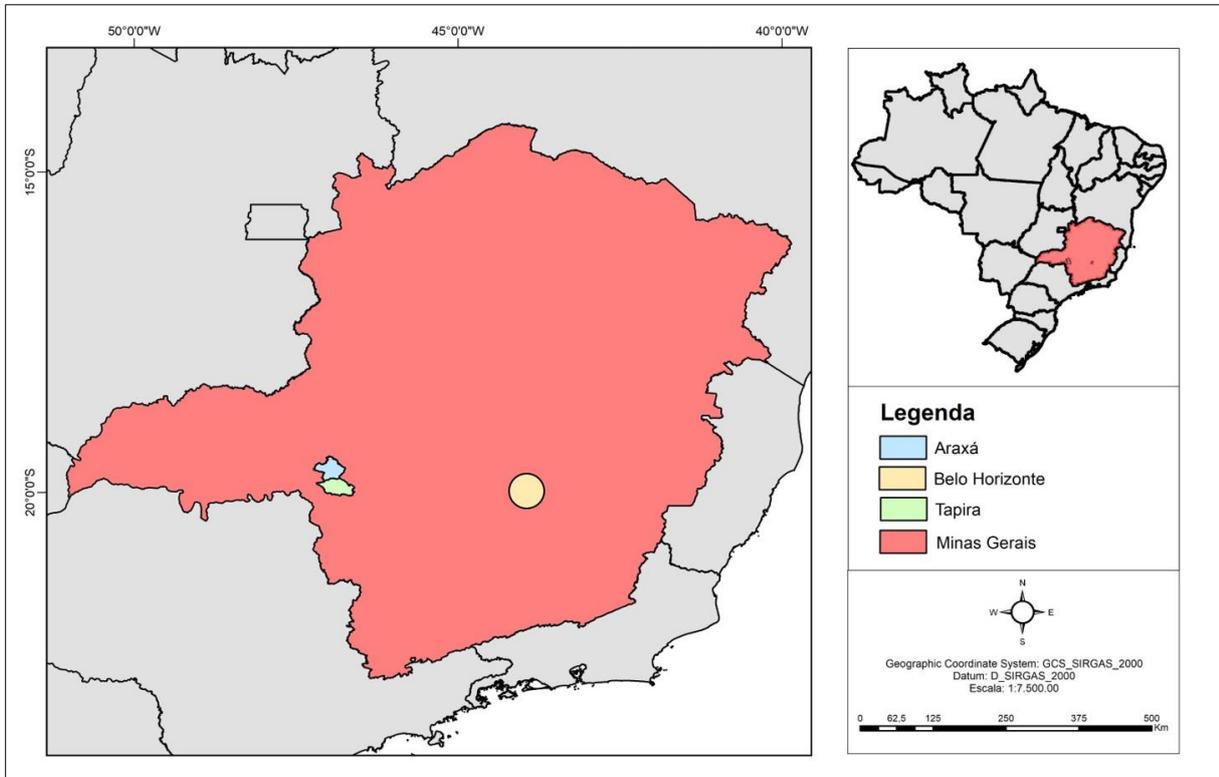
A geração dos materiais com caráter de subproduto em uma mineração requer constantemente a construção de pilhas para atender o armazenamento seguro desse material. Tais pilhas podem ser caracterizadas como aterros e são compostas pelo estéril, em sua maioria, essas são construídas em locais próximos do empreendimento ou das áreas com atividade de mineração e são dispostos concomitantemente com a atividade de mineração.

No Brasil, para a elaboração de um projeto de disposição de estéril em pilha é necessário seguir a norma recentemente revisada ABNT NBR 13029:2017. Esta norma especifica os requisitos mínimos para a construção de pilha dos estéreis ou outros subprodutos gerados por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, minimizando assim, os impactos ao meio ambiente. A aprovação do empreendimento tem como dependência o parecer favorável da Agência Nacional de Mineração - ANM que corresponde atender as Normas Reguladoras de Mineração - NRM no âmbito de Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos, além da aprovação do órgão ambiental competente.

Procurou-se neste trabalho com base em um estudo de caso, discutir os procedimentos necessários para implementação de uma pilha de titânio, que seguem os mesmos parâmetros e condições da pilha de estéril, com foco na apresentação dos principais requisitos técnicos para o dimensionamento, os fatores geotécnicos, a geometria, a classificação quanto à estabilidade física, os controles e monitoramentos tecnológicos da pilha.

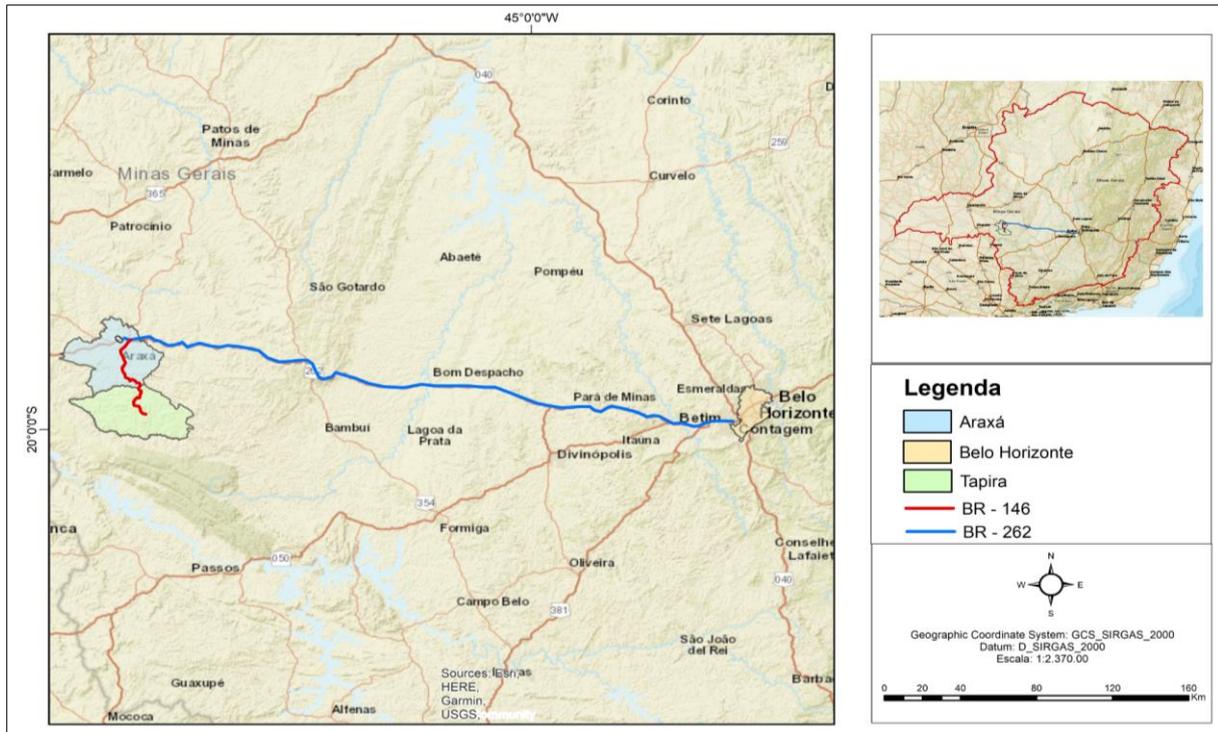
## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo se encontra a oeste do estado de Minas Gerais na cidade de Tapira (Figura 1.1), sendo essa próxima da cidade de Araxá e da região do triângulo mineiro.



**Figura 1.1** - Mapa de localização da área de estudo e seus respectivos posicionamentos em relação ao estado de Minas Gerais, Brasil e da região metropolitana de Belo Horizonte (IEDE 2015).

A região posiciona-se a cerca de 415 km da capital de Belo Horizonte e o acesso à cidade é realizado por duas rodovias principais, a BR-262 e BR-146 (Figura 1.2). A partir de BH, segue-se pela BR-262 por cerca de 362 km até a cidade de Araxá. O acesso a partir da cidade de Araxá se dá pela BR-146 por aproximadamente 57 km até Tapira.



**Figura 1.2** - Mapa das vias de acesso para a cidade de Tapira a partir de Belo Horizonte.

### 1.3 OBJETIVOS

O primeiro objetivo deste trabalho é abordar as principais etapas de dimensionamento e construção da pilha, destacando a escolha do modelo construtivo, os ensaios e parâmetros geotécnicos, capacidade de armazenamento, características geométricas e as técnicas de monitoramento de estabilidade

Além disso, o segundo objetivo desse estudo é propor sugestões e alternativas para otimização da elaboração e formas de monitoramento da pilha de titânio utilizada no estudo de caso da empresa Mosaic Fertilizantes.

### 1.4 JUSTIFICATIVA

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, o setor mineral brasileiro registrou no primeiro trimestre do ano de 2021 uma alta de 95% no faturamento em relação ao primeiro trimestre do ano de 2020. Além disso, a arrecadação da CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais foi 103% superior em relação ao mesmo período de 2020. O Relatório Anual de Atividades do ano de 2020, disponibilizado pelo IBRAM, mostra que o produto de fosfato é o 6º colocado na classificação do Brasil no ranking internacional por produção e reservas de minério (em 2019).

O Plano Nacional de Mineração 2030 - PNM 2030, elaborado pela Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia - MME, é uma ferramenta criada para nortear as políticas de médio e longo prazo que contribuam para que o setor mineral seja a base para o desenvolvimento sustentável do país nos próximos 20 anos. Em uma das diretrizes desse projeto, é pontuada a ação de apoio à pesquisa mineral e ao fomento para abertura de novas minas em áreas com a presença do mineral de fosfato.

Diante da crescente demanda e apoio à produção mineral no país, aumentou-se também a quantidade de resíduos resultantes da operação da lavra na mineração, como os produtos minerados. Esses materiais são direcionados para locais adequados de armazenamento denominados pilhas de disposição ou depósitos. O fator de segurança de tais estruturas é imprescindível, a construção de um depósito carece de um estudo aprofundado desde a escolha do local de estocagem até o monitoramento da pilha já finalizada. Sendo assim, a disposição de estéril exige a regulamentação e a aprovação de critérios rigorosos, respeitando as normas e recomendações técnicas previstas pela lei brasileira, a fim de conter e minimizar danos ambientais e humanos.

## **1.5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Com intuito de alcançar os objetivos propostos nesta monografia, o trabalho foi realizado conforme os itens descritos a seguir.

### **1.5.1 Revisão bibliográfica**

As bases de consulta bibliográfica foram a compilação de informações retiradas em artigos científicos, monografias, teses e publicações de pesquisadores que atuaram na área de geotecnia e realizaram o estudo acerca da implementação e classificação de pilhas de estéril, como Gomes (2012), Aragão (2008), Eaton *et al.* (2005), Reis (2010), dentre outros. Além disso, realizou-se uma coleta de informações sobre as normas regulamentadoras da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT que abordam os procedimentos mínimos para a elaboração e apresentação do projeto de pilhas de estéril no âmbito da mineração, como a norma ABNT NBR 13029:2017.

### **1.5.2 Estudo de caso**

Utilizou-se, neste trabalho, o banco de dados da empresa Mosaic Fertilizantes para a coleta de informações em relação à pilha escolhida para construir o estudo de caso. Para isso, analisou-se o documento denominado Relatório Conceitual e Executivo, o qual remete às principais características do projeto, como os estudos locais, as investigações geotécnicas, os estudos anteriores do local, as análises de estabilidade, a geometria, método construtivo, obras iniciais, drenagem e, por fim, o

programa de monitoramento geotécnico. As fotos do local de execução do depósito e os projetos geométricos também auxiliaram a elaboração do estudo de caso.

Ressalta-se que algumas informações quantitativas e visuais acerca do Projeto de Disposição de Titânio não foram colocadas neste trabalho pelo sigilo acordado entre aluno e empresa, como arranjo geral, fotos do local, coordenada da localização, volume da pilha, cota máxima, resultados de testes de laboratório, parâmetros físicos de amostras da fundação e entre outros.

### **1.5.3 Integração das informações**

Através da revisão bibliográfica e do estudo de caso, compilou-se as informações de modo a correlacionar os principais procedimentos e recomendações previstos na literatura e fomentar as etapas e métodos realizados no depósito escolhido. Dessa forma, pôde-se sugerir e enfatizar estratégias que sejam favoráveis na elaboração e apresentação do projeto de pilha para disposição do estéril.

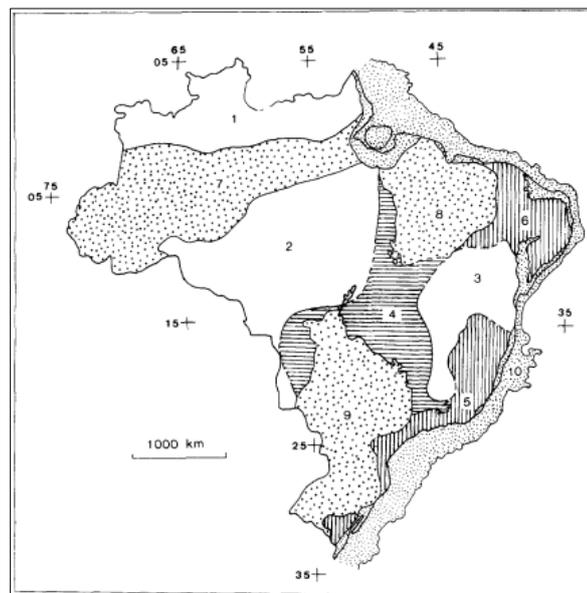


## 2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A área investigada está situada na Faixa Brasília, a qual trata-se de um orógeno colisional, produto do choque entre os crátons São Francisco-Congo e Paranapanema (Silva *et al.* 2012). Este capítulo abordará os conceitos acerca do contexto geotectônico e geológico da Província Tocantins e o segmento meridional da Faixa Brasília.

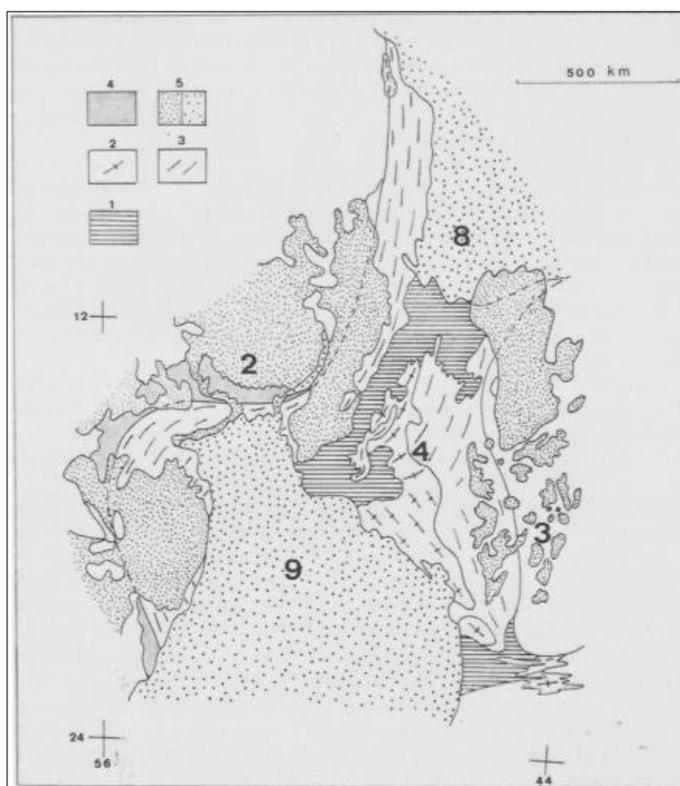
### 2.1.1 Província Tocantins

A Província de Tocantins é um orógeno Neoproterozóico e está localizado no Brasil central (Figura 2.1) entre o Cráton Amazônico e São Francisco, limitada ao norte e ao sul, respectivamente, pelas bacias sedimentares do Parnaíba e do Paraná (Almeida *et al.* 1981). Existem três regiões estruturais presentes nesta província, a primeira é a região central que corresponde em sua maior parte ao mediano maciço de Goiás; a oriental que coincide aproximadamente com os cinturões de dobramento de Uruaçu e de Brasília; e, por fim, a região ocidental com os cinturões de dobramento Paraguai-Araguaia.



**Figura 2.1** - Mapa das províncias estruturais do Brasil. Legenda: 1=Rio Branco; 2=Tapajós; 3= São Francisco; 4=Tocantins; 5= Mantiqueira; 6= Borborema; 7= Amazônico; 8= Parnaíba; 9=Paraná; 10= Província Costeira e Margem Continental (Almeida *et. al* 1981).

Ainda segundo Almeida *et al.* (1981) (Figura 2.2), na região central da província estão dispostas as rochas mais antigas, com idades superiores a 2600 Ma., essas rochas são do tipo gnaiss, incluindo rochas granulíticas localmente migmatizadas e penetradas por rochas granitóides de variadas idades. A parte oriental é marcada por uma grande zona de rochas granulítica.



**Figura 2.2** - Mapa da Província Tocantins. Legenda: 1=Embasamento antigo (Maciço de Goiás na porção central e Maciço Guaxupé na porção sudeste); 2= Cinturão de dobramento Uruaçu; 3= Faixa Brasília; 4= Cobertura sedimentar relacionada a Faixa Brasília; 5= Cobertura sedimentar fanerozoica. (Almeida *et al.* 1981).

No segmento norte da região central há gnaisses antigos de aspecto granodiorítico e com foliação difusa e geralmente sem bandamento. Na parte oriental da região há a ocorrência dos complexos máficos e ultramáficos de Goiânia - Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava, associados a granulitos com idades superiores a 3000 Ma.

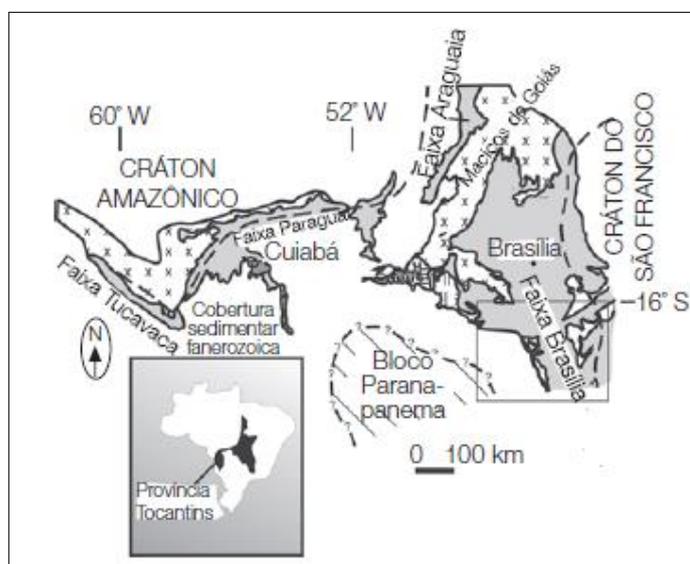
O cinturão de dobramento Uruaçu está ao leste da Província Tocantins e se estende de Natividade em Goiás até a região de Araxá em Minas Gerais. O embasamento de Uruaçu é composto por granulitos, gnaisses, anfibolitos e rochas calcossilicatadas que constituem o Maciço Guaxupé.

De acordo com Almeida *et al.* (1981), a Faixa Brasília entende-se como o desenvolvimento de um flanco oeste e sul do Cráton São Francisco durante o evento Brasileiro. Há atividade magmática nessa faixa envolvendo vulcanismo andesítico ao Norte e a intrusão de plútons graníticos ao Sul. Destacam-se rochas carbonáticas, fosfato sedimentar, chumbo e zinco como constituintes de recursos

minerais. As faixas dobradas Paraguai e Araguaia compreendem-se por uma faixa em forma curva e se desenvolveu na fronteira do Cráton Amazônico e em seus extremos existe a cobertura de sedimentos da bacia Parnaíba e do Paraná.

### 2.1.2 A Faixa Brasília

Ocupando-se a região oriental da Província de Tocantins, a Faixa Brasília trata-se de um extenso sistema de dobramentos neoproterozóicos e situa-se a oeste do Cráton São Francisco (Fuck 1994). Na Figura 2.3 o autor Silva *et al.* (2012) destaca o posicionamento da Faixa Brasília, na qual está limitada entre o Cráton do São Francisco e o Bloco Parapanema, possui mais de 1.000 km de extensão e tem como direção N-S aproximadamente.

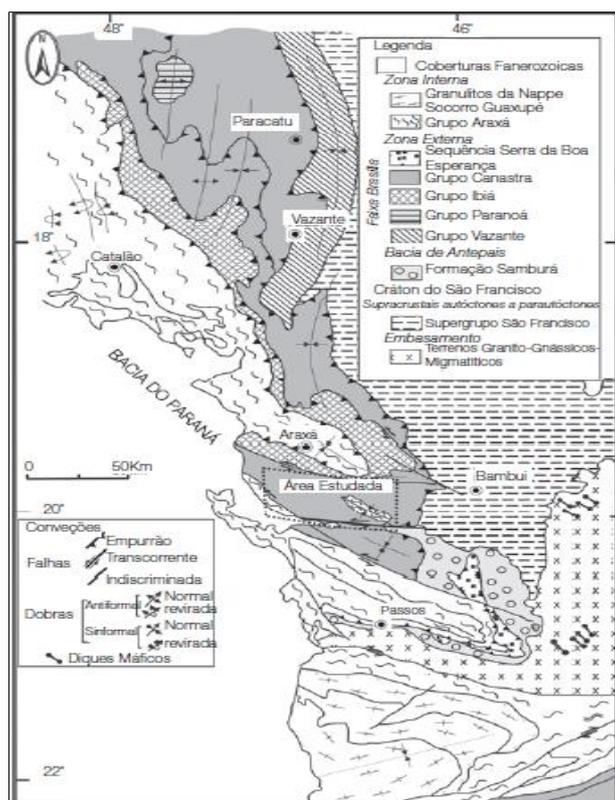


**Figura 2.3** - Mapa da situação da área de estudo em relação à Província Tocantins (Fuck 1994; Silva *et al.* 2012).

A faixa Brasília é compartimentada em regiões, de acordo com Fuck (1994). Primeiramente, há a Zona Cratônica e expõe restritamente o embasamento e extensas coberturas fanerozóicas e precambrianas, como os grupos Paranoá e Bambuí (Fuck 1994). A Zona Externa constitui-se dos grupos Paranoá e Canastra, formações Vazante e Ibiá e localmente o Grupo Bambuí, destaca-se as fácies sedimentares correspondentes a uma margem passiva e metamorfismo de fácies xisto verde (Silva *et al.* 2012). A zona Interna corresponde às unidades constituintes do Grupo Araxá e pelas sucessões metassedimentares e metavulcanossedimentares. O quarto compartimento denomina-se Arco Magmático do oeste de Goiás e abrange os terrenos ortognaissicos e pelas seqüências sedimentares de metassedimentos neoproterozóicos, (Fuck 1994). Por fim, o Maciço Goiano engloba os terrenos granito-greenstone arqueanos e terrenos ortognaissicos paleoproterozóico recobertos pelo Grupo Serra da Mesa

e pela sequência sedimentar de metassedimentos, situado por exemplo na cidade de Crixás (Silva *et al.* 2012).

A área de estudo localizada na cidade de Tapira, em Minas Gerais, pertence ao segmento meridional da Faixa Brasília (Figura 2.4), onde houve uma intensa deformação e ação de metamorfismo, envolvendo um complexo sistema de nappes e empurrões com vergência para o Cráton São Francisco (Silva *et al.* 2012).



**Figura 2.4** - Mapa geológico da porção sul da Faixa Brasília, destacando-se as principais unidades dos compartimentos interno e externo. A área de estudo está ilustrada pelo polígono pontilhado. (modificado de Valeriano, 1999; Silva *et al.* 2012).

## 2.2 GEOLOGIA REGIONAL

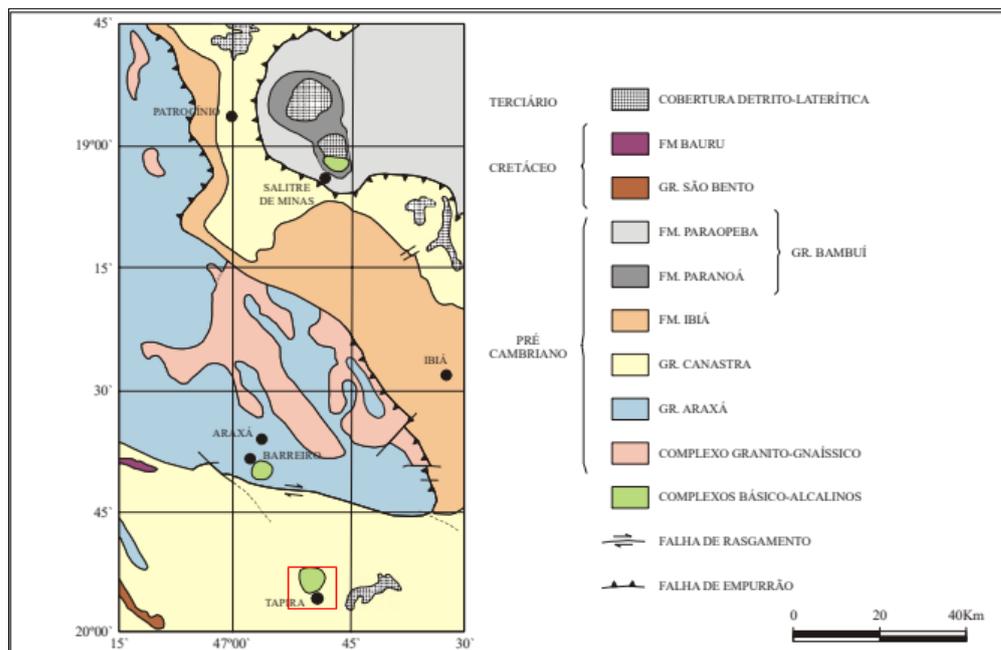
Os complexos alcalinos e carbonatíficos apresentam formas aproximadamente circulares e possuem idades que variam do Pré-cambriano até o Cenozóico (Lapin *et al.* 1999), comumente depósitos economicamente importantes, como nióbio e fosfato, são pertencentes a tais estruturas. Ainda segundo o autor, esses complexos tratam de feições continentais, que estão situados em faixas de dobramentos estabilizados e em regiões de reativação tectono-magmática em crátons estáveis.

É observado, segundo Frolov (1971), que a maioria dos complexos alcalinos carbonatíficos apresentam um aumento no desenvolvimento de rochas ultrabásicas e rochas já alteradas à medida que

há o processo erosivo dos maciços, o que resulta a diminuição na quantidade de carbonatitos. Segundo o mesmo autor, através do magma de origem de grande profundidade e extensão é possível formar as rochas alcalinas-ultrabásicas e carbonatitos, o qual o magma se movimenta de rochas supracrustais até a superfície. Em relação ao contexto evolutivo, há a injeção de material alcalino que substitui os ultrabásitos iniciais e chegam aos níveis de maior topografia do maciço, sendo assim, é observado a construção de zonas definidas na formação dos plutões ou vulcões. Esse processo permite desenvolver camadas verticais com diferenciação de mineralização, como por exemplo, os maciços ultrabásicos são constituídos por titânio, fósforo e flogopita; e os maciços carbonatíticos possuem nióbio, tântalo, urânio e fósforo.

Os complexos carbonatíticos no Brasil são agrupados em cinco províncias geográficas (Rodrigues & Lima 1984), a Amazônica, Alto Araguaia, Alto Paranaíba, Sudeste e Sul. Ocorre nessas províncias um controle tectônico que gera uma orientação ao longo de uma faixa NW-SE e elas estão limitadas às zonas marginais cratônicas, na qual são bordejadas pelas bacias do Paraná e Amazonas. A área de estudo deste trabalho, o complexo de Tapira, está inserida na Província do Alto da Paranaíba, juntamente com os complexos de Araxá, Salitre, Serra Negra e Catalão.

O complexo de Tapira (Figura 2.5) insere-se no Grupo Canastra, caracterizado por metassedimentos pré-cambrianos e cortados por veios de quartzo (Grossi Sad & Torres 1971). Esse Grupo pode ser dividido por duas sequências: a primeira é a porção inferior psamítica constituída por quartzitos micáceos, uma quantidade variável de feldspatos, localmente por hematita e magnetita, intercalações de calcário dolomítico com grafita e quartzo; a porção superior pelítica composta por filitios/xistos, clorita, quartzo e, em menor quantidade, grafita, pirita, rutilo e granada, podendo-se ocorrer lentes de calcário.



**Figura 2.5** - Mapa geológico da região de estudo. A área está ilustrada pelo polígono bordejado em vermelho. (modificado por Chula 2004).

Segundo a compilação de dados de Cruz & Cheney (1976), Grossi Sad & Torres (1971), Grossi Sad & Torres (1976) e Vieira (1997), tem-se a descrição dos tipos litológicos comuns pertencentes ao complexo de Tapira:

- Piroxenitos ou “bebedouritos” são rochas que apresentam geralmente textura granular, quando decompostas de cor verde acinzentada a marrom escuro/amarelado.
- Dunitos apresentam aspecto brechado, granulação fina a média e possuem cor cinza escuro.
- Peridotitos são rochas verde escuro a verde acinzentado, quando não há alteração, ou marrom amarelado/acinzentado quando há. Compõem-se por olivina e piroxênio.
- Glimeritos são os produtos de alteração de piroxenitos e peridotitos, a rocha fresca apresenta cor arroxeada e quando decomposta adquirem tonalidades mais claras.
- Traquitos e Lamprófiros ocorrem na forma de diques, o primeiro são rochas constituídas por fenocristais de sanidina imersos em uma matriz formada por micrólitos de sanidina; o segundo são rochas alcalinas básicas de cor escura e com textura porfirítica.
- Carbonatitos, quando frescos, são rochas com coloração branca/acinzentada e escuras quando decompostas. Ocorrem na porção central do complexo e são constituídas por mais de 90% de calcita.
- Silexitos geralmente apresentam calcedônia, quartzo e goethita e aparecem nas zonas de fosfato.

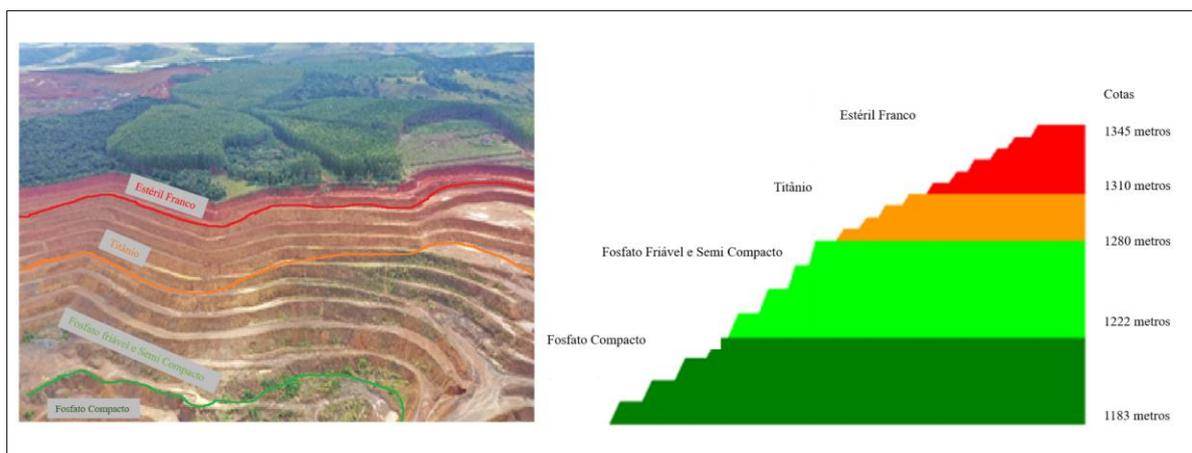
- Fenitos são rochas resultantes do processo de fenitização em relação às rochas da intrusão, como piroxenitos e peridotitos, e as encaixantes da chaminé.

## 2.3 GEOLOGIA LOCAL

O corpo intrusivo referente ao complexo alcalino carbonatítico de Tapira possui dimensões aproximadas de 6,6 x 5,5 km, com eixos NS e EW encaixados em rochas quartzíticas pertencentes ao Grupo Canastra. A Mina de Tapira situa-se na região noroeste do complexo e agrega-se variados corpos de minério de fosfato e estéreis (Reis 2010).

Através da pesquisa mineral na área, foram divididas cinco zonas de mineralização (Santos et al. 2002). A primeira, denomina-se zona de estéril e engloba todo o material com teores abaixo de 5% de  $P_2O_5$  solúvel e menor que 10% de  $TiO_2$ , trata-se de um solo amarelo-avermelhado argiloso. O segundo é a zona de mineralização em titânio, possui teores maiores ou iguais a 10% de  $TiO_2$  e abaixo de 5% de  $P_2O_5$ , ocorrem abaixo da zona de estéril e apresenta diminuição de argila. Em seguida, tem-se a zona de mineralização em fosfato e titânio, no qual é mantido os níveis de  $TiO_2$  da zona anterior e aumenta-se o teor de  $P_2O_5$ , uma vez que o fosfato é predominantemente apatítico. A quarta zona é a de mineralização em fosfato, o intemperismo ocorrido nessa zona é menor que nas partes superiores, sendo assim existe a passagem das zonas de anatásio para uma zona essencialmente de apatita, ocorre também uma zona de rochas duras formadas por piroxenito alterado e silexito. Por fim, a zona de mineralização em Nióbio ocupa a parte central do complexo e possui teores baixos.

O Complexo de Mineração de Tapira (CMT) é uma mina de lavra a céu aberto em cava única e tem como principal minério explotado o fosfato friável. Os horizontes do CMT são separados em quatro: o horizonte estéril franco; titânio; fosfato friável e semi-compacto e fosfato compacto (Figura 2.6).



**Figura 2.6** - Identificação dos horizontes presentes da Frente 2 (lavra) e seção esquemática dos horizontes presentes no Complexo de Mineração de Tapira.

Os materiais pertencentes ao estéril são caracterizados por serem solos argilosos localizados no topo da cava, possuem coloração avermelhada a amarelada, são constituídos por canga, laterita e óxido-hidróxidos de ferro. Os horizontes de titânio são solos argilo-arenosos com coloração marrom clara, são ricos em anatásio e magnetita, ocasionalmente encontra-se caulim como um material branco a rosado e argiloso. Os dois seguintes horizontes tratam do fosfato, o primeiro denomina-se fosfato friável, pouco coeso; o semi-compacto, no qual é uma faixa de transição; e o compacto, rocha sã ou rocha alterada compactada (Reis 2010).

## CAPÍTULO 3

### REVISÃO DA LITERATURA

---

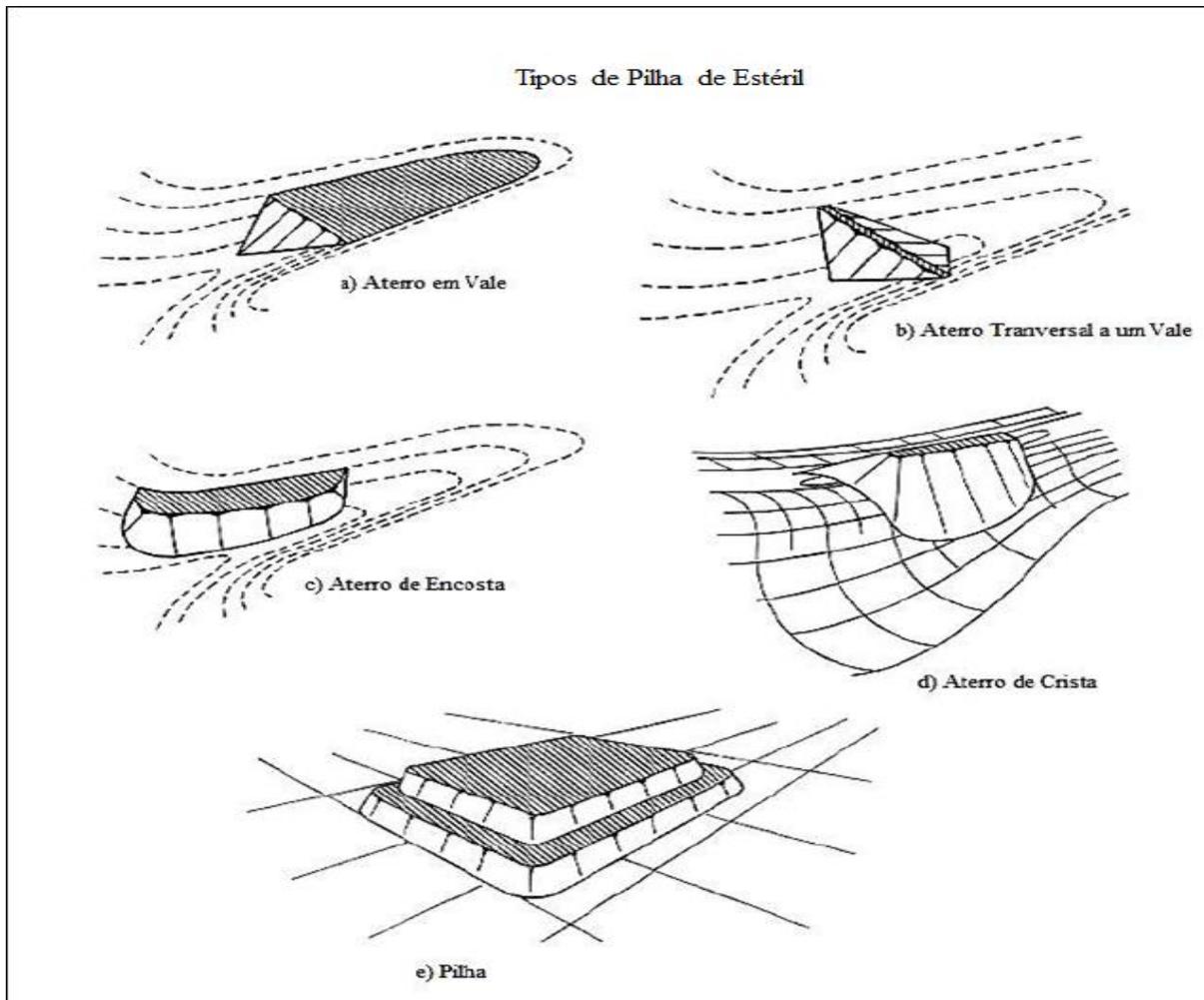
#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, abordam-se os tópicos essenciais acerca da disposição e construção da pilha de estéril, contendo a conceituação e classificação desse empreendimento. Este estudo apresenta também os métodos e procedimentos necessários para a implementação de um depósito de estéril, além da discussão das formas possíveis de monitoramento desse corpo. Importante ressaltar que para a pilha de titânio, o projeto segue as mesmas premissas e condições recomendadas para o projeto de pilha de estéril.

#### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL

Segundo Gomes (2012), as pilhas de disposição de estéril são constituídas por materiais provenientes do decapeamento da jazida. Essas pilhas são compostas por solos e rochas heterogêneas, apresentando variação quanto a granulometria, densidade ou resistência. Os estéreis, comumente, são transportados por caminhões ou por correias transportadoras e são dispostos sob a forma de pilhas em sucessivos alteamentos.

Os empilhamentos podem ocorrer em conformidade com os talvegues e as encostas próximas à atividade de lavra, com intuito de atenuar os custos quanto ao transporte do material estéril. O tamanho, formato, capacidade de armazenamento e topografia da área de disposição são premissas decisórias quanto a geometria da pilha. O sistema de classificação da obra “Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991) classifica, conforme a o arranjo geométrico, as pilhas em, basicamente, cinco modelos (Figura 3.1), podendo ser ou não associados entre si: aterro em vale; aterro transversal em vale; aterro em meia encosta; aterro em cristas; e, por fim, pilhas.



**Figura 3.1** - Os tipos de pilhas de estéril (modificado por BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991).

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DAS PILHAS

No Brasil, a norma ABNT NBR 13029:2017 (terceira edição de 24/07/2017) é a principal fonte regulamentadora para a adequação e construção de pilhas de estéril. Esta norma categoriza os requisitos mínimos para a apresentação e elaboração de projeto de pilha para disposição de estéril gerado por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea, na qual visa atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, mitigando os impactos ambientais.

Entende-se como estéril de mina todo e qualquer material não aproveitável economicamente, no qual é necessária sua remoção para processar e lavar o minério (ABNT NBR 13029:2017). A

disposição de estéril em pilha é realizada pela formação de pilhas deste material de maneira planejada, projetada e controlada.

Para realização da implementação da disposição de estéril deve-se seguir requisitos mínimos para o desenvolvimento do projeto. É necessário o fornecimento de informações básicas, como a identificação e endereço do empreendedor e dados acerca do projeto, como localização, acesso, finalidade, capacidade volumétrica, vida útil operacional e características do material a ser utilizado (ABNT NBR 13029:2017).

### **3.3.1 Ficha técnica da pilha**

É preciso informar os aspectos físicos que definem a pilha de estéril projetada, destacando a altura final, a topografia de base e de crista, ângulo de talude geral, altura das bancadas, largura de berma, ângulos de taludes entre as bermas, capacidade volumétrica, vida útil operacional, área de supressão vegetal e área de ocupação.

### **3.3.2 Estudos**

Deve-se descrever as opções locacionais estudadas, apresentando-as e comparando-as, de forma que a área escolhida seja justificada e colocada no projeto executivo. Os materiais compostos pelos estéreis devem ser descritos e analisados tecnicamente, utilizando-se de ensaios de caracterização química. A amostragem, caracterização e classificação do estéril precisam seguir as normas técnicas ABNT NBR 10004 (Resíduos sólidos - classificação), ABNT 10005 (Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos), ABNT NBR 10006 (Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos) e ABNT NBR 10007 (Amostragem de resíduos sólidos).

A partir da caracterização química do material são fornecidas também as premissas para o projeto de tratamento da fundação da área do depósito. Além disso, é recomendado que seja avaliada a potencialidade de drenagem ácida e lixiviação neutra a partir da implementação do projeto.

A norma ABNT NBR 13029:2017 recomenda que as pilhas que dispõem de estéreis classificados como perigosos demandam a implementação de revestimento impermeabilizante. Caso os estéreis sejam classificados como não perigosos e não inertes é necessário a avaliação hidrogeológica e hidrogeoquímica do projeto de pilha, de modo a verificar se há a vulnerabilidade do aquífero e determinar a necessidade e o tipo de revestimento e/ou controle a ser adotado no projeto. Os estéreis inertes não possuem potencial negativo de afetar ao meio ambiente e a saúde humana, sendo assim, não é demandado qualquer tipo de revestimento.

Os estudos hidrológicos e hidráulicos são requisitos importantes para execução do projeto. É essencial informar e localizar as surgências, além de as caracterizar e definir suas respectivas vazões. Ademais, deve ser apresentado a hidrometeorologia e os estudos das cheias, de forma a auxiliar o dimensionamento das estruturas de drenagem interna e superficial da pilha.

Devido às taxas de geração de sedimentos por erosão na bacia de contribuição da pilha de disposição de estéril, faz-se necessário os estudos sedimentológicos. As estimativas realizadas a partir desse estudo definirão o dimensionamento e frequência de limpeza das estruturas de controle de sedimentos no depósito.

Os estudos e o mapeamento geológicos-geotécnicos de superfície são de suma importância e tem como objetivo orientar a programação das investigações na fundação da pilha. Os materiais de estéril são descritos quanto às suas características geotécnicas, como por exemplo granulometria, grau de alteração, consistência e procedência geológica. Dessa forma, é possível definir as densidades dos materiais e os parâmetros de resistência ao cisalhamento que serão usados para os cálculos de estabilidade referente ao depósito. A partir dos resultados obtidos na investigação dos materiais pertencentes das fundações, elabora-se o projeto de tratamento da fundação e as análises estruturais da pilha, como percolação e adensamento.

### **3.3.3 Projeto da pilha de estéril**

O projeto pode ser separado em três diferentes níveis: o conceitual, básico e executivo (ABNT NBR 13029:2017). O plano construtivo da pilha deve englobar as premissas e hipóteses admitidas, como quantitativo e descrição do estéril, metodologia construtiva, materiais de construção, fatores de segurança e premissas hidrológicas, hidráulicas ou operacionais.

Apresenta-se, então, a geometria e o arranjo geral da locação e o geométrico final da pilha de estéril, considerando a sua respectiva localização, curva de elevação topográfica à medida que se aumenta o volume, sistemas de drenagem e, caso necessário, a estrutura de contenção de sedimentos.

É fundamental descrever e localizar os acessos que serão provisórios, de acordo com a formação ascendente da pilha, e os definitivos, utilizados pelos serviços de manutenção da estrutura. Define-se, também, as etapas sequenciais de formação da pilha, como sequenciamento temporal do aterro, instrumentação, revestimento vegetal, sistemas de drenagem interno e superficial. O preparo das fundações condiz com os procedimentos baseados nos estudos geológicos-geotécnicos, como desmatamento, remoção ou tratamento dos materiais da fundação e controle hidrológico.

Indicam-se os elementos geométricos do arranjo geral da pilha de estéril no projeto geométrico, no qual é informado os principais dados de locação necessários para sua implementação. É indispensável considerar três critérios: os taludes entre as bermas devem ser conformados para inclinações que atinjam os fatores de segurança recomendados; as bermas precisam ter largura suficiente para comportar a drenagem e os acessos aos equipamentos de manutenção de forma segura; e compete uma seção crítica aquela que o ângulo geral da pilha atenda aos fatores de segurança apresentados no Quadro 3.1.

A drenagem interna é dimensionada em função das vazões medidas ou calculadas na área da execução do projeto da pilha. Assim, faz-se necessário apresentar os critérios de dimensionamento do sistema de drenagem, bem como suas locações, geometria dos drenos e especificação do material a ser utilizado. Para o cálculo das vazões é atribuído um fator de segurança mínimo, conforme o Quadro 3.1.

**Quadro 3.1** - Fator de segurança de acordo com os métodos de obtenção da vazão (modificador de ABNT NBR 13029:2017).

Vazão	Frequência da medição	Fator de segurança mínimo	Método de medição
Medida	Mensal – ou com frequência superior – ao longo de um ano hidrológico.	1,5	Equipamentos de hidrometria (molinete, vertedor ou calha Parshal)
Calculada	-----	2,5	-----

Em relação a drenagem superficial, mostram-se as locações e a geometria desse sistema, além das especificações dos materiais que serão aplicados. Há a distinção de três tempos mínimos de recorrência, sendo esses: 100 anos para construções com pequena vazão, como canaletas de bermas e descidas de drenagem entre os taludes; 100 anos para os canais periféricos temporários de coleta e condução de drenagens superficiais; e, por fim, 500 anos para os canais periféricos definitivos de coleta e condução de águas superficiais.

A realização de seções críticas da pilha quanto à sua altura, características da fundação, condições de percolação e parâmetros de resistência permitem aferir as análises de estabilidade do depósito. Os fatores de segurança mínimos considerados para ruptura do talude geral e ruptura do talude entre bermas estão dispostos no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2** - Fatores de segurança da ruptura do talude geral e do talude entre bermas (modificador de ABNT NBR 13029:2017).

Ruptura do talude geral	Superfície	Fator de segurança mínimo
	Freática normal	1,5
	Freática crítica	1,3
Ruptura do talude geral	Face	Fator de segurança mínimo
	Predominantemente de solo	1,5
	Predominantemente de rocha	1,3

Quando necessário de proteção superficial da pilha, especifica-se quais serão os revestimentos a serem aplicados nas plataformas, bermas e taludes. Devem-se constar nas plantas de localização do projeto os instrumentos de controle, juntamente com suas respectivas especificações técnicas e os detalhes construtivos em relação ao monitoramento da pilha de estéril. Caso o material estéril não seja inerte, considera-se também os instrumentos previstos para o monitoramento ambiental.

Como requisitos finais, apresenta-se o plano de desativação conceitual, no qual lista todas as atividades após o final da vida útil operacional da pilha, contemplando as plantas de monitoramento e instrumentação, revestimentos, sistema de drenagem superficial e garantia de estabilidade. Se o uso futuro da área da pilha de estéril estiver definido e/ou houver legislação específica, apresenta-se também o plano de fechamento.

### 3.3.4 Documentos anexados ao projeto

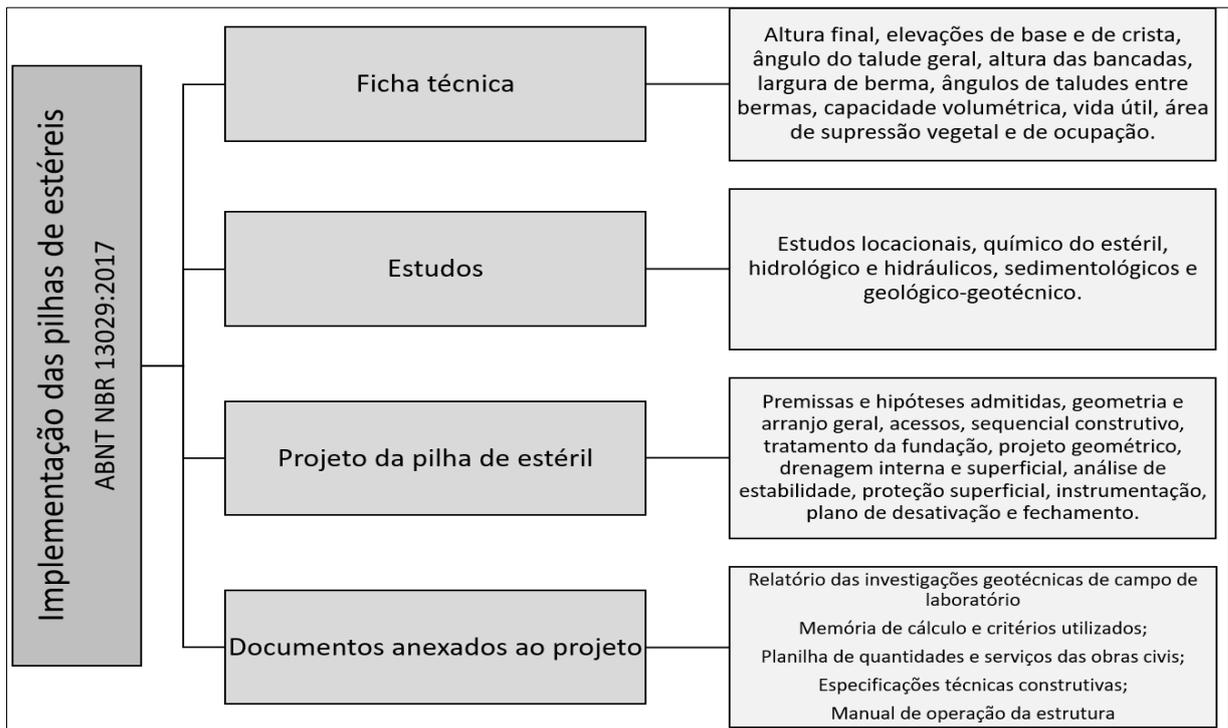
Existem cinco documentos que devem ser anexados juntamente ao relatório, são eles:

1. Relatório das investigações geotécnicas de campo e de laboratório;
2. Memórias de cálculo e critérios utilizados nos projetos;
3. Planilha de quantidades e serviços das obras civis;
4. Especificações técnicas construtivas (critérios de formação da pilha e definição das etapas de sequenciamento);

5. Manual de operação da estrutura (procedimentos de inspeção de campo e monitoramento; atendimento a eventuais emergências).

### 3.3.5 Fluxograma

Em suma, o desenvolvimento da implementação da pilha pode ser detalhado através do fluxograma da Figura 3.2, destacando as principais etapas descritas pela norma ABNT NBR 13029:2017.



**Figura 3.2** – Fluxograma esquemático acerca das etapas para implementação da pilha.

### 3.4 PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO

Para a construção das pilhas de estéril é fundamental o seu respectivo planejamento (Aragão 2008), essa medida pode minimizar problemas econômicos e técnicos nas atividades de mineração como um todo. A fase de planejamento divide-se em etapas, denominadas como fase de exploração, fase de pré viabilidade, fase de viabilidade e projeto preliminar.

Primeiro, segundo Aragão (2008), obtém-se a maioria das informações na fase de exploração e que serão utilizadas nas fases posteriores. Por seguinte, a fase de pré viabilidade trata-se do momento de aquisição de dados específicos sobre as áreas alvos para a disposição do estéril, destacando características como a topografia, hidrogeologia, geologia, clima e pesquisas específicas sobre a área de

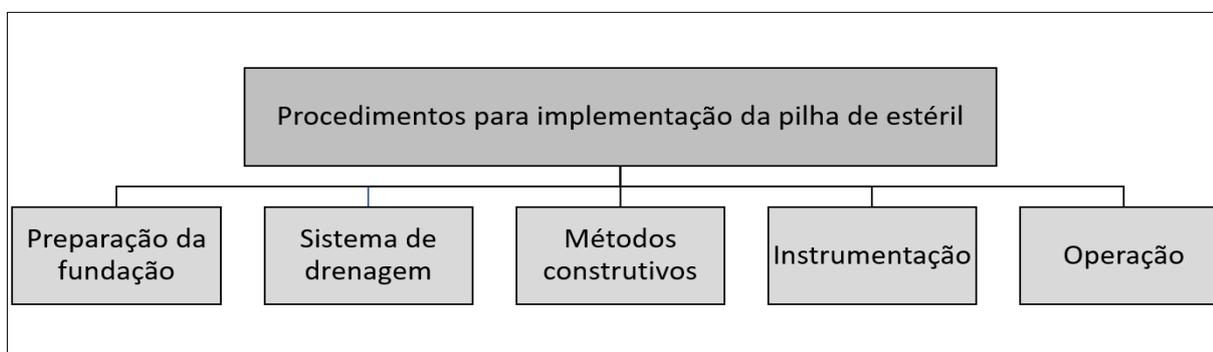
interesse. Outro dado importante na segunda fase é a descrição do material de estéril, bem como os métodos para seu transporte e armazenamento.

O mesmo autor ressalta que é necessário considerar se os locais pré selecionados são viavelmente possíveis, como por exemplo verificar se tais áreas estão em propriedades de uma reserva ecológica, sítio arqueológico ou se possuem nascentes de bacias hidrográficas. Para disposição de pilha de estéril em locais que se classificam como citados anteriormente, é indispensável a autorização dos órgãos ambientais competentes. Além disso, escolher um local com um menor impacto ambiental causado pela implementação da pilha é uma prioridade para a empresa.

As investigações de campo e a pesquisa acerca das características do material de fundação fazem parte da fase de viabilidade, com objetivo de deduzir as melhores avaliações das condições da área alvo e sua respectiva adequabilidade (Eaton *et al.* 2005). O projeto preliminar aborda elementos detalhados dos planos preliminares para a construção do depósito de estéril, como as avaliações dos impactos em potencial, condicionantes ambientais e estratégias para minimizar esses impactos. Finalizando-se a última etapa, é entregue ao órgão ambiental competente o projeto preliminar, cujo projeto terá analisada sua respectiva concessão da licença ou será pontuadas questões que estão em desacordo (Aragão 2008).

Após a aprovação e entrega da licença para o projeto preliminar, inicia-se o desenvolvimento do projeto executivo, no qual contém todas as informações da pilha, como investigação geotécnica, análise de estabilidade, geometria, método construtivo, limpeza da fundação, drenagem e programa de monitoramento geotécnico. A análise da estabilidade geotécnica da estrutura do depósito é uma ação que deve ser assegurada durante a construção e após a implementação da pilha, faz-se necessário o estudo dos tipos de ruptura em pilha sob diversas condições hidrogeológicas.

A Figura 3.3 traduz os procedimentos necessários para executar a implementação da pilha estéril e que serão discutidas a seguir.



**Figura 3.3** – Fluxograma esquemático acerca dos procedimentos para implementação da pilha.

### 3.4.1 Preparação da fundação

Eaton *et al.* (2005) citam que os depósitos de solos orgânicos ou turfosos funcionam como uma superfície desfavorável entre a fundação mais resistente e o estéril, sendo assim, devem ser removidos de forma a favorecer a estabilidade. Caso os depósitos de solos moles sejam menos espessos, devem ser realizadas análises com intuito de verificar se o terreno de fundação fraco se deslocará ou adensará durante o processo de disposição de estéril.

### 3.4.2 Sistema de drenagem

Segundo o autor Aragão (2008), é necessário realizar os desvios dos cursos d'água e estabelecer os serviços de drenagens do local. Em caso de áreas com a presença de surgências ou solos úmidos, pode-se instalar drenos de areia ou pedregulhos que direcionam a água para uma vala coletora. Nas áreas com grandes vazões de drenagem, a instalação de tubos perfurados funciona como uma alternativa para comportar tal vazão. A formação de um aterro com intuito de adensar o solo pertencente à fundação é uma alternativa para remoção da drenagem de solos fracos e saturados.

A água superficial deve ser coletada e direcionada para os canais de escoamento construídos ao redor da pilha ou para o sistema de drenagem interno. Para coleta da água da pilha, recomenda-se um caimento de 1-2% a partir da crista da plataforma de disposição da estrutura. Para fluxos de água menores, é viável a utilização de drenos de fundo de enrocamento, nos quais possuem vantagens econômicas (Eaton *et al.* 2005).

Ferreira (2016) descreve dispositivos que podem ser empregados no sistema de drenagem, sendo eles:

- Canal de proteção de corte que tem como função interceptar águas que escorrem pelo terreno natural a montante impedindo-as de atingir o talude de corte;
- Canal de proteção de aterro, no qual intercepta as águas que escoam pelo terreno a montante e impede-as de atingir o pé do talude de aterro, além disso a estrutura recebe as águas provindas das sarjetas e valetas conduzindo-as aos talvegues;
- Descidas d'água, nos aterros, conduzem as águas provenientes dos canais quando é atingido o seu comprimento crítico e nos pontos baixos (através das saídas d'águas), desaguando no aterro;
- Dissipador de energia é utilizada para dissipar a energia do fluxo da drenagem e reduzir sua velocidade, evitando assim o processo erosivo;
- Escalonamento de taludes evitam que as águas precipitadas sobre as plataformas e sobre os taludes atinjam uma velocidade superior ao limite de erosão do material que compõe a pilha.

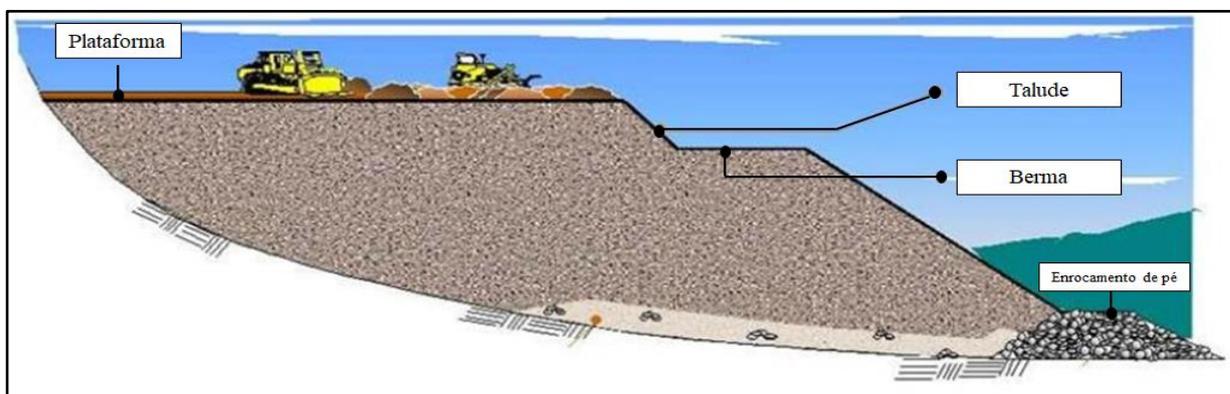
- Canal extravasor pode ser utilizado como uma estrutura hidráulica para medição ou controle da vazão;
- Dreno profundo tem como objetivo interceptar o fluxo de água subterrânea utilizando o rebaixamento do lençol freático. Pode-se utilizar materiais filtrantes, drenantes ou condutores;
- Drenos em espinha de peixe para áreas maiores, podem ser projetados em terrenos que serão construídos aterros e onde há proximidade entre a superfície e o lençol freático;
- Geotêxtil com funções de filtração, separação, reforço, proteção e drenagem transversal da pilha de estéril.

### 3.4.3 Métodos construtivos

O desenvolvimento da construção da pilha é dado pela formação de sucessivas camadas em uma plataforma, espaçadas geralmente por uma altura de 10 metros ou mais. O espaçamento horizontal denomina-se berma e a estrutura entre as bermas é chamado de talude. A estabilidade é definida também pelo controle da largura e comprimento das plataformas, variando-se assim o valor dos taludes e bermas. As bermas são os principais locais de acesso e de drenagem superficial, além de definir o controle erosivo do local.

Usualmente, aplicam-se três métodos de construção de uma pilha, sendo esses:

- Método ascendente: pode ser construído pela forma de bancadas ou camadas, as camadas da pilha são desenvolvidas através de horizontes. A construção da bancada é feita na altura do banco anterior, ou seja, o alteamento é sucessivo e suportado pelo anterior. O pé de cada banco situa-se em uma superfície plana, sendo essa a berma superior (Figura 3.4).



**Figura 3.4** - Método construtivo ascendente por camada (modificado de Aragão 2008).

- Método descendente: é realizado pelo lançamento do material na ponta da pilha com ausência de um planejamento, sem controle ou ordem (Figura 3.5). Não há a compactação do solo ou preparo da fundação previamente à disposição do material. Esse método apresenta maior risco à segurança e apresenta significativo potencial de escorregamento e impacto ambiental (Ferreira 2016).



**Figura 3.5** - Método construtivo descendente (modificado de Aragão 2008).

- Método de disposição por correia: utiliza-se sistemas de correias transportadoras, nas quais são responsáveis por migrarem o material e realizar a sua respectiva disposição. Normalmente, esse método é escolhido quando há uma maior velocidade no alteamento, o que causa um maior índice de vazios e gera uma menor compactação nos taludes (Costa 2017).

### 3.4.4 Instrumentação

Ferreira (2016) defende que para uma construção segura e diminuição de custos, controle construtivo e planejamento, bem como medição de quantidades, é necessário utilizar a instrumentação nas pilhas de estéril. Através do monitoramento da pilha é possível obter informações que meçam o comportamento desse maciço e auxilia na determinação de possíveis superfícies de ruptura ou movimentação da massa, tanto no sentido vertical quanto horizontal. Além disso, as condições de estabilidade podem ser interpretadas através dos resultados e análises de dados verificados pelo sistema de instrumentação.

Recomenda-se apresentar, em um programa de instrumentação, as definições dos pontos a serem medidos, bem como o objetivo e os elementos necessários à interpretação do instrumento; localizar os

instrumentos em planta ou seções transversais; e, por fim, detalhar cada instrumento, como características físicas, modo de instalação, influências externas, processo de cálculo e cronograma de leituras (Ferreira 2016). Os instrumentos mais utilizados no mercado são por exemplo o piezômetro (podendo ser tudo aberto ou *standpipe*, pneumático, hidráulico, elétrico e etc), marco de referência, inclinômetro, pino de referência, medidor de convergência e fios de prumo.

É de suma importância que os instrumentos sejam manuseados e acompanhados por profissionais qualificados, reduzindo assim erros que podem acarretar efeitos negativos significativos.

### **3.4.5 Operação**

Segundo Aragão (2008) o desenvolvimento da disposição de estéril deve ser realizado, preferencialmente, ao longo do comprimento da crista, sendo assim, formaria cristas alongadas e minimizaria a taxa de crescimento vertical do aterro, no qual favorece a estabilidade. Na obra “Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee 1991), citado pelo mesmo autor, defende o aproveitamento das condições geomorfológicas do terreno quanto à disposição do material e a pilha deve ser desenvolvida em vários setores, não apenas em um local.

Recomenda-se que nos locais de ravinas e gargantas, leito de cursos d’água definidos e em terrenos íngremes devem ser colocados materiais rochosos grossos, aumentando-se a resistência ao cisalhamento do contato e permitindo a drenagem de fundo. Nas áreas mais elevadas da pilha coloca-se os materiais de baixa qualidade, sendo esses os materiais friáveis e finos. Em fundações ou locais onde a estabilidade da pilha não é definida pode-se instalar medidores de poropressões.

Os objetivos futuros da pilha de estéril devem estar correlacionados com o desenvolvimento e disposição do material ao longo do tempo. O controle ambiental quanto ao sistema de drenagem, garantia de estabilidade e mitigação dos processos erosivos devem ser considerados ao longo de toda a operação construtiva do depósito. Sendo assim, faz-se necessário as boas práticas de inspeções periódicas de auditores externos, ressaltando a importância da interação entre o projeto e a construção do maciço, além do registro de todas as atividades (Aragão 2008).

## **3.5 MONITORAMENTO DA PILHA**

Com uma significativa importância nas operações executadas em um projeto de operação, a análise de estabilidade de uma pilha de estéril deve-se ser realizada desde o planejamento do projeto até a sua respectiva desativação (Victorino 2016). A avaliação da estabilidade é feita a partir de dados

coletados pelos estudos preliminares e durante a construção, na qual resultará em hipóteses de ruptura para diversas situações encontradas na pilha. Alguns elementos são fundamentais para condicionar a estabilidade da pilha, como o local de instalação, geometria do maciço e as propriedades geotécnicas do material de estéril e da sua fundação. O mesmo autor destaca que os assentamentos ou recalques são os principais efeitos que ocorrem na pilha durante e após a operação no empreendimento, causado pela reorientação das partículas e alteração do material pelo intemperismo.

Segundo Reis (2010), os fatores predisponentes e a ação de causas internas e externas em um maciço pode ocasionar em movimentos de massa nas encostas e nos taludes. O mesmo autor, apresenta como mecanismos de ruptura que ocorrem comumente em taludes de solos de cavas de mineração ou depósitos de estéril os escorregamentos rotacionais, translacionais ou a mistura de processos.

Dado a possibilidade das rupturas e os movimentos de massa foi necessário prevenir esses eventos pelos métodos de análise de estabilidade da pilha, sendo esses métodos numéricos que consideram as propriedades do material que compõem o maciço e o estado de tensões que atuam no talude. É inserido também o fator de segurança ao longo das superfícies para que seja atendido o equilíbrio estático na resultante das forças que atuam no modelo. Dividiu-se os métodos em dois grupos, o primeiro são os não rigorosos, nos quais não são satisfeitas todas as premissas de equilíbrio estático global ou porções individuais; e os rigorosos, as condições de equilíbrio são satisfeitas e são fornecidos resultados mais confiáveis (Reis 2010).

Ainda segundo Reis (2010), outros vários métodos foram desenvolvidos a partir disso, sendo alguns deles: método de Fellenius, considera uma ruptura circular e é dividido a massa deslizante em lamelas; método de Bishop Simplificado, no qual considera os parâmetros do método anterior e acrescenta a resultantes de forças horizontais e cisalhantes como nulas; método Janbu simplificado e Generalizado, a superfície de ruptura é circular ou qualquer e adiciona-se o fator de forças interlamelares; método de Spencer, em uma superfície de ruptura circular considera-se uma resultante de forças interlamelares com inclinação constante através da massa deslizantes; método GLE, em uma superfície de ruptura qualquer a direção da resultante de forças é definida por uma função arbitrada; e entre outros.

Como forma de mitigar as incertezas nos valores obtidos por modelos teóricos, emprega-se os modelos probabilísticos, nos quais possibilitam a quantificação de incertezas associadas aos valores dos fatores de segurança, assumindo-se um índice de confiabilidade e quantificação da probabilidade de ruptura (Álvares 2003). Cita-se como métodos probabilísticos aplicados a Geotecnia a Simulação de Monte Carlo, através de uma série de cálculos de probabilidade é obtido a chance de um evento futuro ocorrer; Estimativas Pontuais, no qual é considerado um valor único e mais provável de definir um parâmetro; e, por fim, o Segundo Momento de Primeira Ordem.

Além dos métodos apresentados, acrescenta-se as análises cinemáticas com objetivo de mitigar as questões envolvendo a estabilidade de taludes, na qual compreende-se da movimentação em potencial em zonas específicas do maciço, através de projeções estereográficas em diagramas de projeção hemisférica. A avaliação de estabilidade de talude pode ser realizada também por meio de retroanálises de rupturas em campo, levando-se em consideração a reconstituição inicial das condições de ruptura, como geometria do talude e forças atuantes, em conjunto de cálculos que utilizam os parâmetros de resistência do material e o coeficiente de segurança (Reis 2010).

Pode-se ser apresentado outro método que aborda o sistema de classificação de uma pilha e auxilia na determinação da estabilidade, Aragão (2008) discute acerca do método “Mined Rock and Overburden Piles” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee 1991). Esse sistema de classificação é dividido em três itens principais, sendo esses:

- Avaliação de estabilidade da pilha: avalia o potencial relativo em termos de estabilidade de forma semiquantitativa, inferindo-se vários parâmetros que irão determinar uma certa pontuação e uma avaliação global da estabilidade da pilha, a partir do cálculo da soma das avaliações individuais de cada fator analisado.
- Classes de estabilidade da pilha: através da avaliação de estabilidade é determinado que a pilha é colocada em quatro categorias previstas no método, denominadas classes. Cada classe define o nível de esforço recomendado para investigação, projeto e construção da pilha.
- Verificação de enquadramento da classe: nesta última etapa é verificado se o nível de esforço utilizado (na fase de projeto, construção, operação ou desativação da pilha) está compatível com a classe enquadrada.

Petronilho (2010) ressalta a metodologia FMEA/FMECA como uma técnica para definir, identificar e eliminar falhas, problemas ou erros em potenciais conhecidos do projeto, sistema, processo e/ou serviço antes que este problema ocorra. O FMEA trata-se de um sistema lógico que hierarquiza as falhas em potencial e proporciona recomendações de ações preventivas. Esse sistema tem como objetivo principal gerar um plano de ação com intuito de evitar falhas no projeto ou processo do produto, busca-se a melhoria contínua e a redução significativa de riscos. As ações resultantes da busca por melhoria pertencem ao método FMECA, no qual a definição das prioridades de falhas é abordada por um método quantitativo de confiabilidade.

Segundo o mesmo autor, a metodologia FMEA/FMECA aplicado a geotecnia e as pilhas de estéril é constituída por três sistemas principais, sendo estes a fundação, o maciço de estéril e os sistemas de drenagem. A execução da metodologia FMEA resulta em uma análise abrangente e detalhada dos modos potenciais de falha, bem como suas respectivas causas e seus efeitos. Como uma forma de extensão da primeira metodologia, a FMECA avalia o grau do risco que as causas e efeitos apresentam,

além de sugerir soluções para tais problemas, analisar a criticidade em questão e o impacto ou dimensão das consequências.

Pereira (2009) destaca que usualmente são utilizados métodos baseados em Equilíbrio Limite para determinar as condições de segurança em uma pilha de estéril, obtendo-se um fator de segurança à ruptura e a análise de estabilidade. Porém, esse método não apresenta informações acerca das deformações e deslocamentos associados ao uso da pilha, sendo necessária uma análise complementar para a previsão das deformações.

Sendo assim, ressalta-se algumas análises que podem ser realizadas em conjunto, como a análise de percolação (*software* Seep/W, GeoSlope) que utiliza métodos de elementos finitos que modelam o fluxo da água e definem a distribuição de poropressões nos materiais, além da avaliação das vazões em diferentes locais do maciço; a análise de tensões e deformações (*software* Sigma/W, GeoSlope) que avalia o comportamento tensão-deformação de solos, considerando análises em regime linear elástico ou elástico-plásticos não lineares; e, por fim, análises de estabilidade (*software* Slope/W, GeoSlope) que utiliza uma definição do fator de segurança dos taludes, modelando-se em solos heterogêneos, diferentes tipos de geometrias de superfície de deslizamento e estratigrafias complexas.

A observação e caracterização de eventos que podem culminar em riscos potenciais às condições da segurança global de uma pilha de estéril podem ser feitas através da instrumentação geotécnica (Reis 2010). Essas ferramentas auxiliam na aquisição, registro e processamento de dados em variadas seções e zonas do maciço, o que permite a detecção de possíveis anomalias nessas áreas. Aplicados na mineração, os instrumentos instalados em um talude auxiliam na verificação se o comportamento do talude está dentro dos limites previstos no projeto e controla a evolução das movimentações de uma dada área.

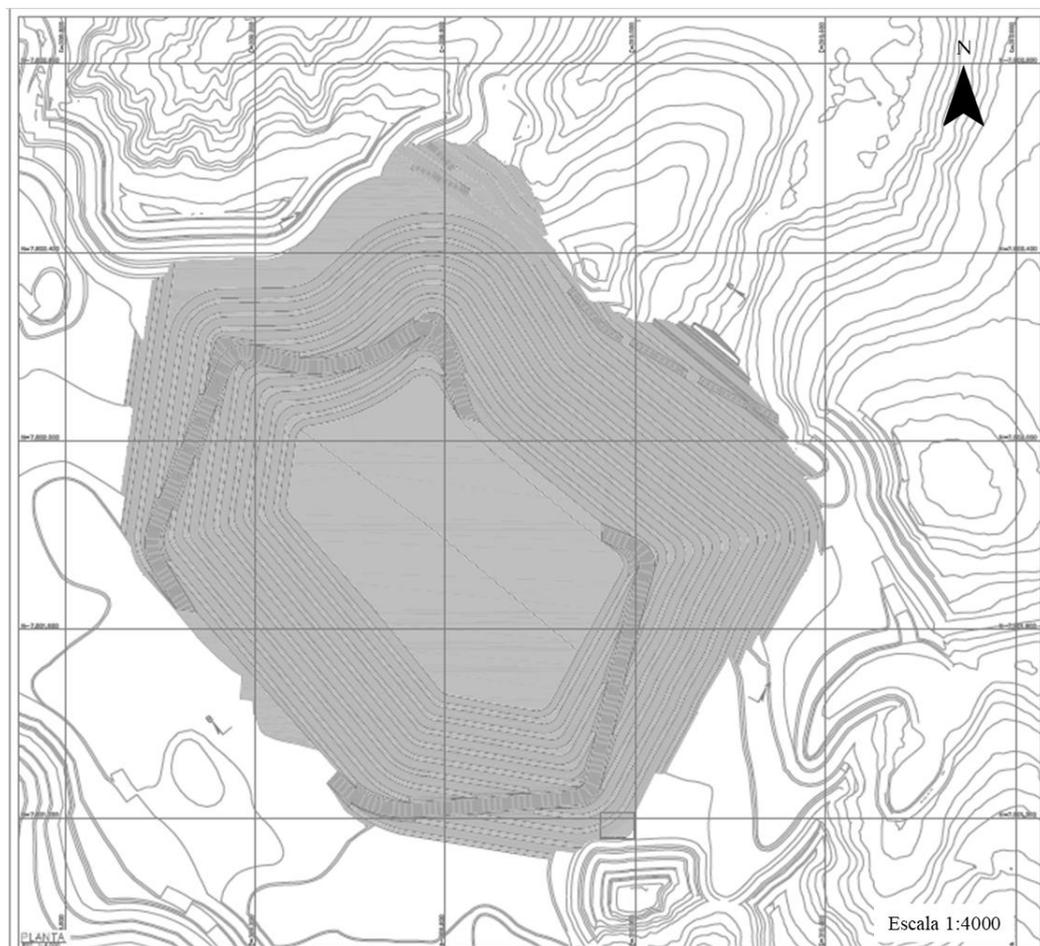
Reis (2010) ressalta que os deslocamentos superficiais podem ser medidos ou observados por meio de prismas e extensômetros de cabo; os deslocamentos subsuperficiais podem ser aferidos por inclinômetros; as variações locais do lençol freático podem ser visualizadas por meio de medidores de NA, denominados INA; e, por fim, as medidas de poropressões no maciço podem ser coletadas pela utilização de piezômetros.

...



#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o estudo de caso referente ao projeto da pilha denominada “Pilha de Disposição de Titânio T6 (PDT-T6)” (Figura 4.1), localizada na cidade de Tapira em Minas Gerais, pela empresa Mosaic Fertilizantes no Complexo de Mineração de Tapira (CMT). A pilha conterà como material o titânio, sendo esse classificado como horizontes de solos argilo-arenosos com coloração marrom clara (horizonte de titânio demarcado na Figura 2.6).



**Figura 4.1** - Mapa de localização da Pilha de Disposição de Titânio – PDT T6 da empresa Mosaic Fertilizantes no Complexo de Mineração de Tapira. (Walm 2021).

Incluem-se neste capítulo as etapas principais dos métodos e procedimentos utilizados no desenvolvimento construtivo da pilha, abordando as atividades teóricas e práticas, desde os estudos

alternativos até a execução do projeto. Os relatórios técnicos e executivos foram realizados em cooperação entre as empresas Mosaic Fertilizantes e Walm.

## **4.2 CLASSIFICAÇÃO DE PILHA DE ESTÉRIL**

A pilha PDT - T6 obtém como seu constituinte o horizonte de titânio, esse possui teores de  $P_2O_5$  abaixo do praticado e com potencial para estudos de viabilidade do titânio. O material que será pertencente a esta pilha será proveniente da região da lavra da mina e o dimensionamento foi elaborado de forma a buscar uma capacidade de armazenamento máximo dentro dos limites disponibilizados pela empresa.

Com o objetivo de definir a geometria final da pilha, estudou-se a análise de estabilidade das alternativas de construção; os parâmetros de resistência; os aspectos bióticos e sociais; a topografia e relevo; a engenharia; a construtibilidade; e, por fim, a razão de volume. Dessa forma, definiu-se, segundo o sistema de classificação da obra “Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), que o arranjo geométrico do projeto se caracteriza como uma pilha associada a um aterro em Vale, uma vez que a estrutura aproveita as curvas de níveis da cava final da mina e parte do terreno natural da propriedade da empresa, como mostrado na Figura 4.1.

## **4.3 IMPLEMENTAÇÃO DA PILHA**

A elaboração do projeto de disposição de titânio T6 atende os critérios e premissas de segurança categorizados pelas normas ABNT NBR 13029:2017 (Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha), ABNT NBR 11.682:2009 (Estabilidade de encostas), ABNT NBR 13.030: 1999 (Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração), pelas deliberações normativas da Agência Nacional de Mineração (ANM), pelos decretos estaduais de Minas Gerais e as recomendações da Comissão Internacional de Grandes Barragens (International Commission on Large Dams – ICOLD).

### **4.3.1 Ficha técnica da pilha**

O PDT-T6 foi desenvolvido de maneira a ser construído de forma contínua de deposição, alcançando a elevação de até 1350 metros, tais dados estão dispostos no Relatório Executivo PDT – T6 (Walm 2021). Caracteriza-se informações importantes nessa etapa do relatório técnico, como relação de construção do talude, largura das bermas, altura de bancos entre bermas, largura dos acessos, altura

máxima da pilha, área de abrangência, volume da pilha, como será realizado a drenagem superficial, a maneira como será escoado as drenagens e, por fim, os instrumentos que serão instalados.

Neste item é apresentado, por exemplo, que a relação da inclinação do talude H:V, dado pela razão da altura (H) e o ângulo de inclinação (V) do talude, foi adotado como 2,0:1,0 para garantia de sua respectiva estabilidade. Essa equação significa a proporção do tamanho em metros da distância horizontal (berma) com o tamanho vertical (talude) que será utilizado na construção da pilha, ou seja, 2 metros na horizontal para 1 metro na vertical.

#### **4.3.2 Estudos**

Os estudos são iniciados a partir da avaliação geológica da fundação, de forma a apontar as principais características do material que constitui essa área. Através de campanhas anteriores realizada no Complexo de Mineração de Tapira (CMT), observou-se que o terreno é composto por um horizonte de colúvio que possui uma textura argilo-siltosa, com uma plasticidade que varia de baixa a média, o material apresenta consistência mole a média, contém matéria orgânica e tem como espessura 1 a 3 metros (Walm 2021). Em maior profundidade, há níveis de solos residuais e saprólitos que apresentam uma textura silto-argilosa e silto-arenosa, sua consistência varia de mole a dura e exibem uma espessura de até 30 metros. Em sequência existem as rochas sã ou com diferentes graus de alteração.

A partir dos ensaios triaxiais e de adensamento, além da caracterização física, das amostras presentes na fundação em laboratório, obteve-se os parâmetros de resistência dos horizontes de solo residual, colúvio, rocha sã e alterada. Esses parâmetros são utilizados para calcular a análise de estabilidade da estrutura aplicado a seções geológico-geotécnicas da pilha.

O segundo estudo importante para a execução do projeto é o desenvolvimento das pesquisas referentes aos fatores hidrológicos e hidráulicos. A primeira metodologia aplicada é a determinação da quantidade de chuva na área do projeto, sendo essa calculada através da altura de chuva diária fornecida pela Agência Nacional de Águas. O segundo método é a determinação das áreas de contribuição, regiões que contribuem com drenagens na estrutura; o tempo de concentração, que é calculado pela razão entre o comprimento do trecho de escoamento e a velocidade média da drenagem; e o uso e ocupação do solo.

A terceira metodologia envolve o cálculo das vazões dos canais presentes no projeto utilizando o Método Racional, que consiste na transformação da quantidade de chuva em vazão através da aplicação do coeficiente de escoamento, determinado a partir do uso e tipo do solo. As vazões encontradas nesse cálculo são utilizadas para o dimensionamento e verificação das estruturas de drenagem. Por último, tem-se o estudo do dimensionamento hidráulico dos dispositivos de drenagem, no qual é considerado que as estruturas serão verificadas em um tempo de retorno de 100 anos. Nessa

fase é definido para as estruturas de drenagem, por exemplo, a largura da base do canal, a inclinação das paredes laterais, a altura e declividade do canal, a velocidade e entre outros.

### 4.3.3 Projeto da pilha de estéril

No projeto conceitual do PDT-T6 avaliou-se o estudo de três alternativas para a construção da disposição de estéril, a compilação de informações e comparações entre as alternativas obtêm o intuito de auxiliar a tomada de decisão da melhor escolha de alternativa. Em primeiro lugar apresenta-se o arranjo geométrico de cada opção, destacando a inclinação dos taludes, a altura dos bancos e a largura das bermas (Figura 4.2).



**Figura 4.2** - Mapa de localização das três alternativas estudadas para o projeto PDT T6 da empresa Mosaic Fertilizantes no Complexo de Mineração de Tapira. (Walm 2021).

Realiza-se as análises de estabilidade nas seções em planta e nas seções mais críticas de cada alternativa estudada, os parâmetros de resistência são dados pela compilação de informações preliminares obtidas através das campanhas de investigações geotécnicas dos materiais de cada fundação. Para cada análise adota-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e a teoria do equilíbrio limite pelo método Spencer, o fator de segurança mínimo utilizado para a estrutura segue a premissa da norma ABNT NBR 13029:2017, sendo esse com valor de 1,5.

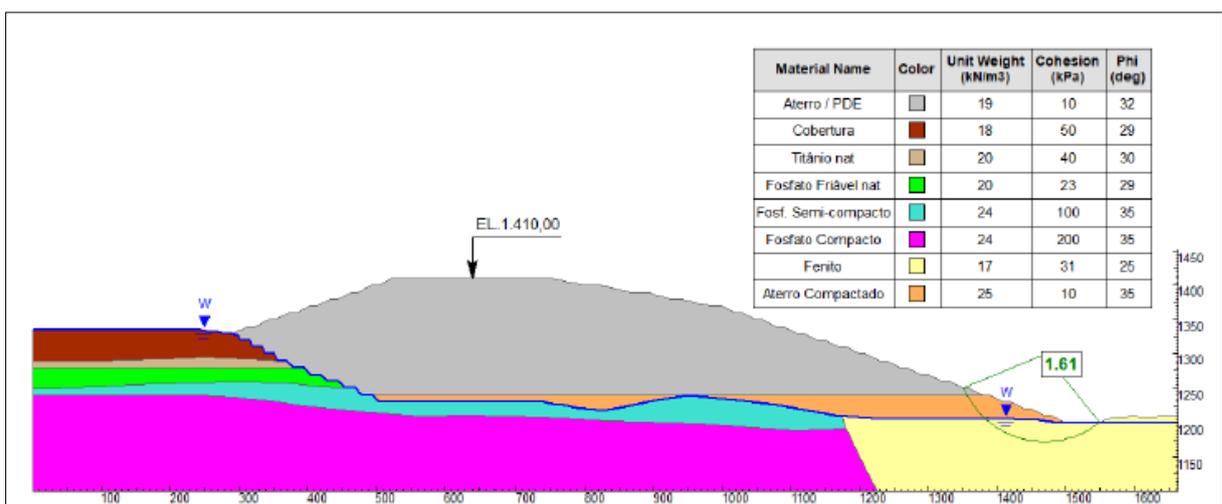
As principais características das opções estudadas são apresentadas, como a área total, volume total, altura e cota máxima. É executado para cada alternativa a investigação da capacidade de retenção de sedimentos e, assim, o cálculo do volume para armazenamento dos sedimentos na região da bacia de drenagem e o volume para sedimentação responsável pela decantação dos sólidos suspensos que estão no escoamento.

Como complemento da pesquisa, é realizado uma análise crítica das alternativas a partir da enumeração das vantagens de desvantagens referentes aos aspectos bióticos, relacionado a intervenção e dimensão da vegetação; os aspectos sociais, pontuando a presença de vilarejos, se está situado em propriedade o Complexo de Mineração de Tapira (CMT), se há interferência com a propriedade federal

ou estradas de acesso, drenagens naturais e visuais; a topografia e relevo, como altura e cota máxima da estrutura; a engenharia, relacionada a fundação, estabilidade e sistema de drenagem; a construtibilidade e razão de volume disponível *versus* demandado. Utilizando-se uma pontuação para cada item revisado durante o estudo é escolhido a melhor alternativa, que possui a maior pontuação, para ser o Projeto de Disposição de Titânio – T6.

A alternativa que obteve melhores resultados partindo de uma análise crítica foi a alternativa 1, essa considerou-se altura dos bancos e a largura das bermas como 10 metros. Para a realização das análises de estabilidade dessa alternativa é utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e a teoria do equilíbrio limite pelo método de Spencer. No critério de resistência de Mohr-Coulomb é empregado os parâmetros de resistência, de coesão e o ângulo de atrito do material. O método analítico de equilíbrio limite de Spencer abrange a hipótese que as forças que tendem a induzir a ruptura da estrutura são balanceadas pelos esforços resistentes, é admitido uma superfície preferencial onde a resistência ao cisalhamento será mobilizada pela massa que rompeu (Borges 2021).

As análises de estabilidade dos taludes foram confeccionadas aplicando-se o programa Slide 8.0, da empresa Rocscience, que consiste no estudo matemático e sistêmico de uma seção crítica empregando os parâmetros dos materiais presentes nela, como peso específico, coeficiente de coesão e o ângulo de atrito. O resultado dessa simulação são os fatores de segurança na seção. A Figura 4.3 representa uma das análises realizadas na seção crítica presente na alternativa 1, cujo Fato de segurança encontrado foi de 1,61 (Walm 2019). Os parâmetros de resistência de cada tipo de material encontrado nessa seção foram calculados e apresentados em estudos anteriores da empresa.



**Figura 4.3** – Análise de estabilidade realizada na seção crítica da Alternativa 1 utilizando-se o programa Slide (Walm 2021).

A alternativa 1 apresentou resultados positivos quanto a avaliação dos aspectos bióticos, sociais e de engenharia. A área da estrutura de disposição de titânico nessa alternativa está situada parte na cava final e parte em terreno natural, necessitando apenas da supressão vegetal de algumas regiões. Não há a presença de vilas e a área escolhida está inserida nos limites da propriedade do Complexo de Mineração de Tapira. Além disso, a opção 1 não interfere em nenhuma das drenagens naturais presentes no complexo, apresenta alta eficiência da frota e favorável balanço de DMT (distância média transportada), uma vez por estar localizada, em parte, na área de lavra de minério.

#### **4.3.4 Documentos anexados ao projeto**

São alguns documentos disponibilizados juntamente com o relatório do Projeto de Disposição de Titânio T6:

1. Lista de documentos e desenhos;
2. Relatório Técnico – Mapeamento Geológico-Geotécnico;
3. Relatório Técnico – Especificação técnica das investigações geológico -geotécnica complementares;
4. Relatório de consolidação dos resultados dos ensaios laboratoriais;
5. Consolidação de dados, critérios e premissas;
6. Base topográfica;
7. Arranjo Geral;
8. Limpeza e escavação da fundação;
9. Sistema de drenagem interna e superficial;
10. Instrumentação;
11. Sequência e acessos construtivos;
12. Supressão vegetal;
13. Plano de fechamento;
14. Especificação técnica construtiva;
15. Planilha de quantidades.

#### **4.4 PROCEDIMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO**

A construção do PDT – T6 foi dividida em fases, a primeira referente ao relatório técnico do estudo das alternativas do projeto, a segunda relacionada ao projeto conceitual da alternativa escolhida e o projeto executivo. A etapa de exploração das opções bem como o projeto preliminar permitem definir uma área com maior adequabilidade e inibe os impactos em potenciais. Para execução da implementação

da pilha de disposição de estéril é imprescindível que algumas etapas sejam concluídas, como a preparação da fundação, a edificação do sistema de drenagem, o método construtivo adotado, a operação da estrutura e a constituição e montagem dos instrumentos.

#### 4.4.1 Preparação da fundação

Em sequência da definição da alternativa do projeto, inicia-se a etapa de tratamento da fundação, que, nesse estudo de caso, aplica-se a supressão vegetal da mata presente na região e a remoção da camada superficial do solo; a remoção do solo com baixa resistência e a impermeabilização da fundação da pilha com solo argiloso compactado.

#### 4.4.2 Sistema de drenagem

Para a execução dos estudos hidrológicos e hidráulicos do PDT – T6 foi utilizado o Método Racional que considera o parâmetro “c” como coeficiente de escoamento superficial, levando em consideração o uso e ocupação do solo. Foi definido uma área de contribuição de drenagens circundada na área da estrutura do depósito, sendo assim, os valores dos parâmetros foram ponderados a partir do uso do solo mapeado dentro dessa área (Quadro 4.1).

**Quadro 4.1** – Valores do coeficiente de escoamento superficial de acordo com a tipologia de uso e ocupação do solo (Modificado de Walm, 2021).

Tipologia de uso e ocupação do solo	Coeficiente de escoamento superficial
Sem vegetação - solo exposto	0,65 - 0,40
Campo natural - vegetação baixa	0,50 - 0,30
Arbusto cerrado - vegetação média	0,45 - 0,30
Floresta e matas densas	0,05 - 0,2
Áreas de cultivo	0,35 - 0,25
Cava	0,60 - 0,70
Pilhas de estéril - superfície exposta	0,60 - 0,50
Pilhas de estéril - com cobertura vegetal	0,50 - 0,30
Taludes de barragens gramados	0,50 - 0,30

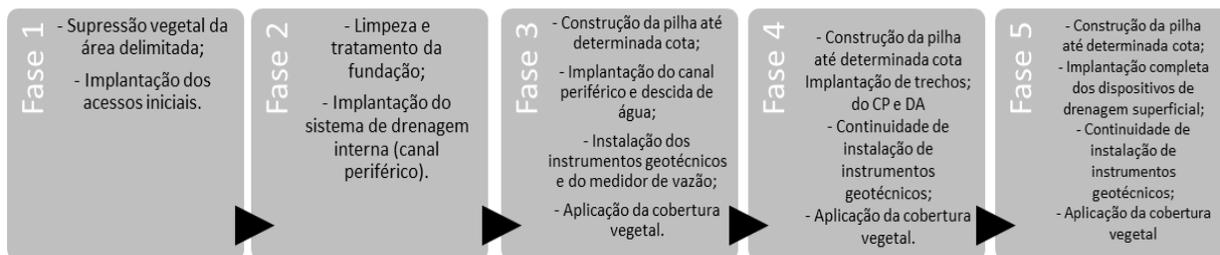
Nos locais onde há trechos de escoamento em drenagens e acessos utilizou-se o método cinemático para cálculo do tempo de concentração, que é dado pelo somatório da divisão entre os comprimentos e a velocidade média nos trechos. As vazões de projetos dos canais foram calculadas utilizando-se o Método Racional, no qual consiste em transformar a quantidade de chuva em vazão a

partir da aplicação do coeficiente de escoamento. Dessa forma, através da quantificação da vazão, dimensiona-se as estruturas de drenagem, sendo que no PDT-T6 foi escolhido a utilização dos seguintes dispositivos:

1. Canaleta de berma com declividade transversal em relação ao talude de 3,0% e declividade longitudinal de 1,0%, permitindo a descida da água para os canais periféricos, sendo essas dimensionadas e verificadas considerando um intervalo de tempo de retorno de 100 anos;
2. Canaleta de topo com objetivo de drenar o escoamento do topo da pilha para as descidas de água, considerando um tempo de retorno de 100 anos para verificação e dimensionamento. Essas estruturas possuem formato trapezoidal, com inclinação das paredes 1,0H:1,5V e declividade longitudinal de 0,5%;
3. Descidas de água (DA) que intercedem o fluxo das bermas aos canais periféricos, tais estruturas são dimensionadas e verificadas considerando um retorno de 100 anos;
4. Canais de acesso que intercedem o fluxo das bermas aos canais de acesso e, assim, direcionando a drenagem para os canais periféricos. As estruturas são dimensionadas e verificadas levando em conta um tempo de retorno de 100 anos;
5. Canais periféricos (CP) que conduzem o escoamento das descidas de água, das bermas e das áreas adjacentes para o fluxo direcionado aos reservatórios da Barragem BR. Considera-se um tempo de retorno de 500 anos para as estruturas serem verificadas e dimensionadas.
6. Medidor de vazão triangular com uma altura de 0,2 metros considerando uma vazão de 6,18 litros/segundo.

#### **4.4.3 Método construtivo**

O projeto da Pilha de Disposição de Titânio – T6 adotou cinco principais etapas no desenvolvimento do sequenciamento construtivo (Figura 4.4), aplicando-se em todas elas o método construtivo ascendente. A primeira fase marca a supressão vegetal da área limitada pelo projeto e é implantado os acessos construtivos. A limpeza e tratamento da fundação juntamente como a implantação do sistema de drenagem interno marca a segunda etapa da sequência.



**Figura 4.4** – Fluxograma referente as etapas do sequenciamento construtivo do Projeto de Disposição de Titânio – T6.

A terceira etapa consiste na disposição de estéril até determinada elevação, além da implementação do dreno de pé, o canal periférico e da descida de água. Nessa etapa tem-se também a implantação das instrumentações geotécnicas e o medidor de vazão na saída do dreno de pé, além dos taludes serem cobertos por vegetação. Em sequência, na quarta etapa, aumenta-se a cota de elevação do depósito e continua-se a implantação de dispositivos de drenagens e instrumentos geotécnicos. Por fim, na última etapa, alcança-se a cota máxima e todos os dispositivos e instrumentos calculados no projeto são instalados.

#### 4.4.4 Instrumentação

Para garantia e monitoramento da estabilidade da pilha de disposição de titânio projetou-se um plano de instrumentação para o PDT – T6. A estrutura conterà com quatro dispositivos, sendo esses o piezômetro, o indicador de nível d'água, o marco superficial e o medidor de vazão. No Relatório Técnico Executivo do projeto (Walm 2021) consta a quantidade, a localização e a função de cada instrumento, juntamente com sua respectiva coordenada, cota de topo e profundidade.

O primeiro aparelho utilizado é o piezômetro e tem como objetivo acompanhar a evolução dos níveis de sub-pressão desenvolvidos e a condutividade hidráulica do solo. Foram mapeados a instalação de 23 piezômetros localizados na fundação, todos previamente identificados com seus nomes, coordenadas, cota de topo em metros e sua profundidade. Na pilha planeja-se a instalação de 23 dispositivos de indicadores de nível d'água, que são responsáveis pelo monitoramento dos níveis freáticos estabelecidos no interior da pilha. Além disso, serão 25 marcos superficiais dispostos e instalados ao longo da pilha, com intuito de acompanhar e monitorar os recalques e deslocamentos horizontais da estrutura. A jusante da saída da drenagem interna será implantada o medidor de vazão triangular, que permitirá as leituras acerca da vazão percolada desse escoamento.

Para melhor localização e facilidade de instalação dos instrumentos é fornecido a planta e seções de locação previstos em cada fase do sequenciamento construtivo. Essa planta é informada em desenhos desenvolvidos pelo software AutoCAD e é disponibilizado em arquivos com formato DWG e PDF.

#### **4.4.5 Operação**

Em relação as operações do Projeto de Disposição de Titânio – T6 é sugerido pelo relatório técnico executivo o cumprimento de cinco etapas construtivas, seguindo-se concomitantemente as atividades de lavra do minério e a disposição do estéril. A disposição de estéril escolhida é de forma ascendente, ou seja, quando se finaliza um banco é iniciado a implantação do banco superior.

Na finalização das operações e no início do plano de fechamento, apresenta-se algumas medidas essenciais que devem ser realizadas nessa situação, como:

1. Manutenção no sistema de drenagem superficial da pilha e da cobertura vegetal, checar se há a necessidade da retirada ou ampliação dela;
2. Checar se existe a possibilidade da implantação gradativa de espécies nativas ou o plantio de gramíneas utilizando a técnica de hidrossemeadura;
3. Manutenção do monitoramento dos instrumentos da pilha e avaliar se é necessário a instalação de novos;
4. Tratamento das erosões e processos que aumentam a instabilidade do maciço;
5. Limpeza da drenagem interna;
6. Monitoramento das vazões dos drenos;
7. Manutenção e revestimento periódicos das bermas, cristas e platôs.

O monitoramento do maciço de disposição de estéril é essencial, avaliar pontos como os indícios de fissuração na estrutura, a integridade das juntas de concretagem e existência de obstruções nas seções de escoamento das drenagens minimizam impactos negativos quanto a estabilidade da pilha. O sistema de proteção superficial é um outro fator importante, utiliza-se a aplicação de camada de solo orgânico através da implantação pelo método de hidrossemeadura. Nos taludes pode-se aplicar o microveamento nas superfícies, que consiste na retenção de sementes em pequenas superfícies e auxiliam no desenvolvimento da vegetação

#### **4.5 MONITORAMENTO DE ESTABILIDADE DE PILHA**

O monitoramento de estabilidade do maciço é dado pelo monitoramento visual e pela interpretação da leitura dos instrumentos. O monitoramento geotécnico auxilia no acompanhamento de possíveis mudanças nas condições de estabilidade da pilha a partir das informações coletadas, tanto visuais como técnicas, e permite mitigar danos na estrutura.

#### 4.5.1 Monitoramento visual

As inspeções em campo consistem uma das principais atividades relacionadas ao monitoramento visual da pilha, busca-se visitar o local onde o depósito foi implantado e as estruturas envolvidas no projeto, como os canais de drenagem superficiais, a estrutura de contenção de sedimentos, os drenos e entre outros. São verificados os seguintes pontos:

- As condições geométricas das bancadas. A Figura 4.5 demonstra a configuração das bancadas e bermas de uma pilha de estéril localizadas dentro do Complexo de Mineração de Tapira – CMT, a geometria apresentada é um exemplo das condições que são utilizadas pela empresa Mosaic Fertilizantes e estão de acordo com o projeto executivo da respectiva pilha.



**Figura 4.5**– Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando a geometria do maciço (Fotos de drone da Mosaic Fertilizantes 2021).

- A existência do acúmulo de água nos taludes de origem pluvial. Um exemplo de uma situação de acúmulo de drenagem na superfície da berma entre taludes está demonstrado na Figura 4.6, localizado em um depósito de estéril em CMT.



**Figura 4.6** – Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando o acúmulo de água na superfície da berma (Fotos de drone da Mosaic Fertilizantes 2021).

- A existência de processos erosivos na superfície do talude, trincas, deslizamentos e depressões na crista, nos taludes ou nas bermas. A Figura 4.7 é um exemplo de um processo erosivo no talude, a imagem localiza-se em um depósito de estéril em CMT.



**Figura 4.7** – Imagem de drone de uma pilha de estéril no Complexo de Mineração de Tapira destacando o processo erosivo nos taludes (Fotos de drone da Mosaic Fertilizantes 2021).

- Os fatores de deformações ou indicativos de instabilidade do sistema aterro e fundação;
- Verificação das estruturas de drenagem, ressaltando a importância de identificar processos erosivos, pontos de assoreamento e locais com possíveis danos no revestimento.

#### **4.5.2 Monitoramento por instrumentos**

Com finalidade de garantir a maior segurança da estrutura da pilha, a leitura e acompanhamento dos instrumentos avalia o comportamento e as condições do depósito. São algumas das verificações que devem ser realizadas: controle de vazões da drenagem interna; deformações; controle do nível de água no interior do maciço; e, por fim pressões internas na fundação.

No projeto da Pilha de Disposição de Titânio – T6 (Walm 2019) é destacado os instrumentos que serão utilizados para o monitoramento, sendo eles:

- Marcos superficiais: avaliam o recalque da estrutura em todas as etapas construtivas da pilha até a fase de descomissionamento, são instalados nas bermas;
- Indicadores de nível d'água: permitem a coleta de informações sobre as condições de saturação e avalia o funcionamento do sistema de drenagem, são implantados ao longo da estrutura do maciço;
- Medidores de vazão: leitura das vazões percoladas pela pilha, são instalados na saída do sistema de drenagem interno;
- Piezômetro tipo Casagrande: conhecimento e avaliação das poropressões desenvolvidas ao longo das etapas construtivas do maciço, são inseridos na fundação da pilha.



# SUGESTÕES PARA OTIMIZAÇÃO DA PILHA T6

---

## 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, integram-se temas que tem como objetivo sugerir práticas que otimizem a operação e manutenção do Projeto de Disposição de Titânio – T6. As sugestões de atividades discutidas são fruto de uma compilação de dados coletados a partir da revisão da literatura nesse trabalho, além do ajuste de ações que a empresa Mosaic Fertilizantes efetua em seus processos envolvendo as análises de estabilidades de depósitos e estruturas.

O estudo das propostas de potencialização e incremento envolve utilizar o sistema de classificação de Pilha de estéril adotado pela obra “Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991); implementar medidores de deslocamento de superfícies; incrementar a análise geotécnica realizada pela Mosaic Fertilizantes nas etapas construtivas do PDT - T6; e, por fim, calcular o fator de segurança das seções críticas ao longo do sequenciamento construtivo.

## 5.2 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE PILHA

No trabalho de Aragão (2008), o autor revisa a classificação de pilha de estéril publicada na obra “Mined Rock and Overburden Piles” (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), que tem como objetivo, a partir do enquadramento da pilha em classes, recomendar o nível de esforço para a investigação, projeto e construção da estrutura. Além disso, busca-se verificar se na fase atual da pilha (projeto, construção, operação e desativação) o nível de esforços está condizente com sua respectiva classe.

O método apresentado é uma forma de avaliação simples que analisa por meio de pontuação as características principais da pilha e oferece as melhores medidas e atividades de monitoramento e inspeções. A pontuação máxima possível para uma pilha é de 1800 pontos, quanto maior a pontuação maior será sua classe. Esse sistema é dividido em três fases, sendo elas: a avaliação de estabilidade da pilha, as classes de estabilidade da pilha; e a verificação de enquadramento da classe.

### 5.2.1 Avaliação de estabilidade da pilha

Nessa etapa a avaliação da estrutura é realizada de forma semiquantitativa, cujo é avaliado fatores principais que influenciam diretamente a estabilidade da pilha. Dependendo da das condições

descritas em cada fator é atribuído uma pontuação e no final dessa avaliação é somado os valores inferidos em cada seção. Os Quadros 5.1 e 5.2 demonstram os fatores, as condições e a respectiva pontuação aplicados nessa fase da metodologia.

**Quadro 5.1** – Primeiro quadro de pontuação do Sistema de classificação de pilhas de estéris aplicado na avaliação da estabilidade da pilha (modificado de Aragão 2008).

Fatores chave que afetam a estabilidade		Condições ou Descrições		Pontuação
Configuração da pilha	Altura	< 50 m		0
		50 m - 100 m		50
		100 m - 200 m		100
		>200		200
	Volume da Pilha	Pequeno	< 1 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /banco	0
		Médio	1 – 50 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /banco	50
		Grande	> 50 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /banco	100
	Inclinação do talude	Suave	< 26°	0
		Moderado	26° - 35°	50
		Íngreme	> 35°	100
Inclinação da fundação	Suave	10°	0	
	Moderado	10° - 25°	50	
	Íngreme	25° - 32°	100	
	Extrema	> 32°	200	
Grau de confinamento	Confinado	- Talude côncavo em planta/seção; - A terros em vale ou transversais a um vale; - Ravinas que podem ser usadas para limitar a inclinação da fundação.	0	
	Moderamente confinado	- Bancos naturais nos taludes; - Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural; - Empilhamento dos estéris em encostas, vales abertos ou transversais a vales.	50	
	Sem confinamento	- Talude convexo em planta/seções; - A terros de enconta ou aterros de crista sem confinamento de base; - Sem bancos para auxiliar a construção.	100	
Tipo de fundação	Competente	- Materiais da fundação tão ou mais resistentes que os da pilha; - Não sujeita a efeitos adversos da poropressão; - Sem estruturas geológicas desfavoráveis.	0	
	Intermediária	- Ganho de resistência do solo com adensamento; - Dissipação do excesso de poropressões com o controle da taxa de carregamento.	100	
	Fraca	- Capacidade de suporte limitada, solos moles; - Sujeito a excesso de poropressão; - Condições adversas de água subterrânea, sugência ou infiltrações; - Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação.	200	
Qualidade do material da pilha	Alta	- Resistente, durável; Menor que 10% de finos.	0	
	Moderada	- Moderamente resistente, durabilidade variável; - 10% a 25% de finos.	100	
	Pobre	- Predominância de rocha fraca de baixa durabilidade; - Mais de 25% de finos, material de cobertura.	200	

**Quadro 5.2** – Segundo quadro de pontuação do Sistema de classificação de pilhas de estêreis aplicado na avaliação da estabilidade da pilha (modificado de Aragão 2008).

<b>Fatores chave que afetam a estabilidade</b>	<b>Condições ou Descrições</b>		<b>Pontuação</b>
<b>Método construtivo</b>	Favorável	- Bancos ou camadas não muito espessas (<25m), plataformas largas; - Disposição ao longo de curvas de nível; - Construção ascendente; - Construção por terraços.	0
	Misto	- Bancos ou camadas moderadamente espessas (25m - 50m) ; - Métodos mistos de construção.	100
	Desfavorável	- Bancos ou camadas muito espessas (>50m), plataformas estreitas; - Disposição abaixo da linha de queda do talude; - Construção descendente.	200
<b>Condições piezométricas e climáticas</b>	Favorável	- Baixas pressões piezométricas, sem surgências na fundação; - Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha; - Precipitação limitada; - Infiltração mínima na pilha.	0
	Intermediária	- Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação; - Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha; - Precipitação moderada; - Alta infiltração no interior da pilha.	100
	Desfavorável	- Altas pressões piezométricas, surgências na fundação; - Significativo potencial de desenvolvimento limitado da superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha; - Moderada/Alta precipitação.	200
<b>Taxa de Disposição</b>	Baixa	- < 25m <sup>3</sup> /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista < 0,1 m por dia.	0
	Moderada	- 25 - 200 m <sup>3</sup> /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista de 0,1 - 1 m por dia.	100
	Alta	- > 200 m <sup>3</sup> /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista > 1 m por dia.	200
<b>Sismicidade</b>	Baixa	Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter)	0
	Moderada	Zona de risco sísmico 2 e 3 (Escala Richter)	100
	Alta	Zona de risco sísmico 4 ou maior (Escala Richter)	200

### 5.2.2 Classes de estabilidade da pilha

Nessa segunda etapa a pilha pode ser classificada em quatro classes distintas, essa divisão varia de acordo com a quantidade de pontos acumulados nos Quadros 5.1 e 5.2. Para cada classe é definido o potencial de ruptura e o nível de esforço recomendado para as fases de investigação, projeto e construção da pilha de estéril (Quadro 5.3).

**Quadro 5.3** – Quadro de Classificação da Estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado aplicado na avaliação da estabilidade da pilha (modificado de Aragão 2008).

<b>Classificação da estabilidade da pilha</b>	<b>Potencial de ruptura</b>	<b>Nível de esforço recomendado para as etapas de investigação, projeto e construção</b>	<b>Faixa de pontuação da pilha</b>
<b>I</b>	Desprezível	- Reconhecimento básico do local, documentação de referência; - Programa mínimo de ensaios de laboratório; - Rotina de checagem de estabilidade; - Restrições mínimas na construção; - Monitoramento visual	< 300
<b>II</b>	Baixo	- Investigação completa do local; - Poços de inspeção, amostragem obrigatória; - Programa limitado de ensaios de laboratório; - Estabilidade pode ou não influenciar no projeto; - Análise básica de estabilidade obrigatória; - Restrições na construção; - Monitoramento visual e de instrumentos de rotina.	300 - 600
<b>III</b>	Moderado	- Investigação detalhada do local, em etapas; - Poços de inspeção obrigatórios ou outros tipos de investigações de subsuperfície; - Amostragem indeformada pode ser obrigatória; - Programa detalhado de ensaios de laboratório; - Estabilidade influencia e pode controlar o projeto; - Análises detalhadas de estabilidade, estudos paramétricos; - Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/permissão; obrigatória; - Restrições moderadas na construção; - Monitoramento detalhado de instrumentos para confirmar o projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamentos.	600 - 1200
<b>IV</b>	Alto	- Investigação detalhada do local em etapas; - Poços de inspeção e possíveis trincheiras, obrigatórios; - Sondagens e outras investigações subsuperficiais obrigatórias; - Amostragem indeformada obrigatória - Programa detalhado de ensaios de laboratório; - Considerações sobre a estabilidade são essenciais; - Análises detalhadas de estabilidade, estudos paramétricos e avaliação completa das alternativas; - Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/permissão; obrigatória; - Restrições severas na construção; - Monitoramento detalhado de instrumentos para confirmar o projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamentos.	> 1200

Além das atividades de esforços recomendadas pelo método discutido, é apresentado também ações que podem ser adotadas relacionadas ao monitoramento instrumental e as inspeções realizadas na pilha. É pontuado ações que podem ser feitas e é sugerido a instalação de alguns instrumentos, acrescentado de uma breve descrição do plano de inspeção dessas medidas. O Quadro 5.4 demonstra as sugestões de monitoramento instrumental e descrição das tarefas para cada classe de pilha, juntamente com a frequência e o tipo de relatório aplicado.

**Quadro 5.4** – Quadro de Monitoramento instrumental e inspeções aplicado na avaliação da estabilidade da pilha (modificado de Aragão 2008).

Classes da pilha	Monitoramento instrumental	Descrição	Frequência	Relatórios
I	Inspeção visual; Piezômetros onde é aplicável.	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório Diário
		Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Anual	Relatório Anual
II	Instrumentação necessária se há movimentações ou observação de adensamento; Piezômetros onde é aplicável.	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório Diário
		Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feito pelo engenheiro	Diário	
		Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Quadrimestral/Anual	Relatório de inspeção quadrimestral Relatório interno anual
II	Instrumentação para monitoramento de movimentações especificado pelo projetista; Piezômetros onde é aplicável.	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório Diário
		Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feito pelo engenheiro	Diário	
		Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral
		Inspeção por um auditor independente	Anual	Relatório anual
II	Programa de inspeção detalhada a ser especificado pelo projetista; Piezômetros onde é aplicável; Piezômetros em fundações caso tenha a presença de solos finos.	Encarregado de turno faz a inspeção	4 horas	Relatório Diário
		Inspeção e interpretação dos resultados da instrumentação feito pelo engenheiro	Diário	
		Inspeção periódica detalhada realizada pelo engenheiro	Mensal	Relatório interno de inspeção quadrimestral
		Inspeção por um auditor independente	Anual	Relatório anual

### 5.2.3 Verificação do enquadramento da classe

A partir da classificação da pilha é verificado nessa fase se o nível de esforço sugerido pelo Quadro 5.3 está compatível com as atividades desenvolvidas em tempo real na estrutura. Ademais, o Quadro 5.4 é disposto como um guia para analisar se existe a compatibilidade entre o monitoramento instrumental, as inspeções e a frequência da confecção dos relatórios com as ações implementadas atualmente na pilha.

A partir do comparativo e da pesquisa acerca das pontuações levantadas pelo Sistema de Classificação apresentado pela obra “Mined Rock and Overburden Piles (BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991), é permitido uma análise racional e qualitativa simples a respeito da pilha de estéril. Essa análise pode ser implementada em todas as etapas construtivas do depósito, de forma a acompanhar seu desenvolvimento e minimizar riscos quanto ao potencial de ruptura.

### **5.3 MEDIDORES DE DESLOCAMENTO DE SUPERFÍCIE**

A grande parte dos materiais estão sujeitos à algum tipo de deformação e posterior alteração da sua geometria interna quando os aplicam algum tipo de esforço (Machado 2007). Segundo o mesmo autor, algumas técnicas podem ser utilizadas para determinar os deslocamentos das estruturas a partir de um significativo e preciso monitoramento delas.

Como forma de calcular os deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície, Machado (2007) destaca a utilização do instrumento denominado inclinômetros. Esse instrumento é uma das ferramentas mais utilizadas no mercado e é empregado para medição e compilação de dados acerca do deslocamento de materiais em um determinado ponto no interior de uma estrutura, podendo assim avaliar a estabilidade de taludes, escavações e obras rodoviárias.

O inclinômetro possui duas funções principais, a primeira é mensurar as deformações e deslocamento de massas de solo e a segunda é mapear regiões que contenham concentrações de deformações, indicando áreas com potencial de ruptura. Esse aparelho é composto por um arranjo de tubos plásticos e são instalados, normalmente, em furos de sondagem vertical. A inclinação do instrumento em relação aos deslocamentos horizontais é dada pelo movimento de um pêndulo interno com alta precisão, as medidas são fornecidas em intervalos constantes.

As informações obtidas referentes a movimentação horizontal são passadas para gráficos e, assim, é permitido a quantificação da inclinação de cada trecho em relação ao eixo do tubo no qual o inclinômetro foi inserido. Dessa forma, tem-se o acompanhamento do deslocamento transversal aos longos dos anos da estrutura em estudo. Portanto, com a supervisão aprofundada da estrutura é possível identificar as áreas com maiores potenciais de risco e, a partir disso, construir planos de contingências e de correção desses locais.

A escolha por esse instrumento se justifica pela alta procura no mercado de mineração por inclinômetros, podendo serem instalados em variados locais na mina, como depósitos e barragens. Os inclinômetros possuem alta qualidade e alta confiabilidade nos resultados, podendo conter leituras manuais ou automatizadas. Além disso, essa ferramenta pode aproveitar em sua instalação locais onde foram feitos furos de sondagem, aproveitando assim recurso financeiro da empresa.

### **5.4 ANÁLISE GEOTÉCNICA**

A estabilidade dos taludes e o escoamento de água superficial é analisado pela empresa Mosaic Fertilizantes através do Módulo Analyser, que consiste na interpolação de dados da topografia do local

estudado, a setorização geotécnica da área e o limite referente ao estudo. O diagnóstico gerado por essa ferramenta resulta a caracterização das bermas, taludes, áreas planas e superfícies de acúmulo de água.

O primeiro resultado é referente aos taludes, nos quais são classificados pelo software como taludes com ângulo de face abaixo do projeto, quando o ângulo de face e altura da berma estão abaixo do projeto; ângulos de face conforme projeto, quando o ângulo de face e altura de berma estão de acordo com o do projeto; ângulos de face acima do projeto, quando o ângulo de face e altura de berma ultrapassam o do projeto.

O segundo resultado está relacionado com as bermas, sendo essas classificadas como áreas planas; bermas aprovadas, quando as bermas possuem medidas de acordo com o projeto; e bermas reprovadas, quando as medidas das bermas estão em desacordo com as medidas do projeto. O terceiro arquivo resultante gerado são as áreas com acúmulo de água e as drenagens preferenciais da área. É fornecido também o dado em porcentagem das áreas com acumulação de água compara com a área analisada.

A partir da análise geotécnica da área é possível mapear as principais áreas onde há conformação ou desvios nas premissas construtivas de um projeto de pilha de estéril. A identificação das áreas com maiores infiridades (como bermas reprovadas, taludes com ângulo de face acima do projeto e regiões com acúmulo de água) podem ser traduzidos como pontos de atenção e de maiores chances de ruptura na estrutura analisada. A partir desse reconhecimento é possível traçar planos que atenuam os imprevistos relacionados a acidentes e falhas nos taludes e berma.

Portanto, ressalta-se a importância e aplicabilidade do Módulo Analyser em todas as etapas construtivas de uma pilha de disposição de estéril, sendo esse software uma ferramenta imprescindível para o monitoramento e levantamento de dados desde a sua implantação até sua finalização.

## **5.5 FATOR DE SEGURANÇA**

Segundo a autora Borges (2021) o fator de segurança de um talude é calculado a partir do método de equilíbrio-limite, no qual define-se o tipo da falha de acordo com a geologia do talude e é avaliado o desenvolvimento das tensões dessa área. A análises de estabilidade buscam prever possíveis superfícies de ruptura através do estudo das forças que atuam e intensificam o potencial de rompimento.

A empresa Mosaic Fertilizantes utiliza nas análises de estabilidade de taludes de frentes de lavra o método do equilíbrio limite e a técnica de Spencer e *GLE/Morgenstern-Price*, como resultado obtém-se o fator de segurança do talude. Para esse método é empregado os elementos geométricos, hidrogeológicos, geológico-geotécnicos e os parâmetros de resistência das litologias envolvidas na área analisada. Para confecção dessas análises é utilizado programa Slide da empresa Rocscience.

Para cada análise pode ser definido os critérios de aceitação do fator de segurança, classificando os intervalos como um potencial de ruptura baixo, médio ou alta, por exemplo. Após inferido o fator de segurança de uma seção crítica pode-se concluir se ele está de acordo ou não com as premissas mínimas de estabilidade, sabendo-se assim se existe ou não um potencial de ruptura da seção.

Esse estudo é útil para identificar áreas que apresentam risco quanto à estabilidade de talude e podem ser utilizados em seções críticas de uma disposição de estéril. Sendo assim, a aplicação no sequencial construtivo de um depósito de estéril podem trazer vantagens no estudo do risco de ruptura desde suas fases iniciais até no seu respectivo plano de fechamento.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

Este trabalho envolveu a compilação de dados a partir da revisão da literatura dos principais procedimentos e premissas que são utilizadas no desenvolvimento e implementação de uma pilha de estéril. Focou-se nas principais e mais recomendadas formas do preparo da fundação do depósito, na constituição do sistema de drenagem, nas alternativas dos métodos construtivos, na instalação dos instrumentos e a operação na estrutura.

Avaliou-se de forma aprofundada os tópicos essenciais em relação a construção e elaboração da pilha de estéril segundo a norma ABNT NBR 13029:2017, que categoriza os fatores mínimos para apresentação e confecção de um projeto de depósito de estéril. Foram discutidos os requisitos mínimos para a implantação das pilhas, sendo eles a ficha técnica da estrutura, os estudos que devem ser realizados; o projeto conceitual e construtivo; os documentos que necessitam ser anexados; e, por fim, ferramentas de monitoramento do maciço.

No estudo de caso da Pilha de Disposição de Titânio – T6 explanou-se as principais características físicas do depósito, pontuando os métodos e procedimentos adotados para confeccionar o projeto da pilha. Abordou-se a classificação da pilha; os critérios e premissas de segurança; a ficha técnica; os estudos geológicos, hidrológicos e hidráulicos envolvidos; o projeto e discussão das alternativas locais e geométricas; os documentos anexados ao projeto; os procedimentos para implementação, como preparação da fundação e sistema de drenagem; e o monitoramento da estabilidade da pilha.

A partir do comparativo entre o material e informações coletadas pela revisão da bibliografia e a revisão do projeto PDT – T6, chegou-se às conclusões:

1. A norma ABNT NBR 13029:2017 é uma base de suma importância que deve ser seguida para elaboração de projetos de disposição de estéril, é pontuado itens e atividades mínimas necessárias para a construção de uma estrutura que atinja um grau de segurança desejável e minimiza impactos negativos ao entorno. Porém, a norma contém informações breves e sucintas sobre suas recomendações, não há especificidades nos itens abordados.
2. O projeto PDT – T6 atende os requisitos mínimos dispostos na norma ABNT NBR 13029:2017. Foi tratado no projeto todos os tópicos apresentados na norma, como a ficha técnica da pilha; os estudos locais, químico do estéril, hidrológico e hidráulico, sedimentológicos e

geológico-geotécnicos; os dados acerca do projeto, como geometria, arranjo geral, análise de estabilidade; e, por fim, os documentos incluídos ao projeto.

3. O detalhamento das atividades previstas no desenvolvimento da implementação, desde a preparação da fundação até as etapas finais do sequenciamento construtivo, são significativamente favoráveis e possuem um amplo e firme embasamento.
4. O projeto PDT -T6 seguiu também os principais procedimentos previstos da revisão bibliográfica. Os principais métodos apresentados pela literatura envolvendo preparação da fundação, sistema de drenagem, métodos construtivos, instrumentação e operação são adotados no projeto executivo da pilha.
5. A norma ABNT NBR 13029:2017 específica apenas os valores recomendados para os fatores de segurança calculados pela análise de estabilidade de acordo com a ruptura do talude (talude geral ou talude entre bermas). A norma não define as ferramentas que possam ser usadas para esse cálculo, bem como não é discutido as formas de monitoramento da pilha de estéril.
6. É atendido pelo PDT -T6 os fatores de segurança de talude recomendados pela norma ABNT NBR 13029:2017 a partir da análise de estabilidade da pilha.
7. O monitoramento da estrutura da pilha é colocado de forma concreta no projeto PDT -T6, sendo realizado o monitoramento visual do maciço e dos instrumentos (marcos superficiais, indicadores de nível d'água, medidores de vazão e piezômetros tipo Casagrande). É adotado pelo projeto algumas técnicas de monitoramento de pilha apresentados pela revisão da literatura.
8. Podem ser acrescentadas medidas de ampliação e otimização nas ferramentas de monitoramento, que foram apresentadas neste trabalho como Sistema de Classificação de Pilha; medidores de deslocamento de superfície pelo instrumento inclinômetro; análise geotécnica pelo Módulo Analyser em todas as etapas construtivas da pilha; e, por fim o cálculo do fator de segurança através da análise de estabilidade de seções críticas utilizando o software Slide nas fases de construção do empreendimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13029: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração. Rio de Janeiro, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13030: Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Rio de Janeiro, 1999.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*. **17**:1-29.
- Álvares, R.A. 2003. *Análise Probabilística dos Taludes da Mina de Gongo Soco/ CVRD*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 130 p.
- Aragão, Giani Aparecida Santana. 2008. *Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 104 p.
- BC Mine Waste Rock Pile Research Committee. 1991. *Mined Rock and Overburden Piles*. Investigation & Design Manual, Interim Guidelines. 128 p.
- Borges, Rubia Prado. *Estudo de otimização da geometria da cava Morro da Oficina aliado ao rebaixamento do Nível d'água do maciço*. 2021. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 144 p.
- Brito Neves, B. B; Cordani, U. G. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. 1991 *Precambrian Research*. **53**:23-40.
- Costa, B. S. 2017. *Simulação de alternativas locacionais de depósito de estéril para uma mina de fosfato*. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá. 48 p.
- Chula, A. M. D.. 2004. *Caracterização mineralógica de minério fosfático da Mina de Tapira*. Tese de Doutorado, Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 336p.
- Cruz, F. F. & Cheney, T.M. 1976. Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, MG. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia. Ouro Preto. *Actas*, v.1, p. 89-107.

Castro, J. N. 2022, Dimensionamento e Classificação de Pilha de Estéril...

Eaton, T., Broughton, S., Berger, K.C., Piteau Associates Engineering Ltd. 2005. *Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps*. Under License from the British Columbia Ministry of Energy and Mines, Mine Dump Committee.

Ferreira, F.A.B. 2016. *Pilha de estéril: dimensionamento e classificação*. Monografia, Especialização em Geominas, Universidade Federal do Pará, Belém. 75 p.

Frolov, A. A. 1971. Vertical zonation in deposition of ore, as in ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites. *International Geology Review*. **13**: 685-695.

Gomes, Leonardo Leopoldo. *Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) - Pilha de Estéril Sul - Carajás/PA*. 2012. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 160 p.

Grossi Sad, J. H. & Torres, N. 1971. *Geologia e recursos minerais do complexo de Tapira, Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte, Geologia e Sondagens Ltda (GEOSOL). 68 p.

Grossi Sad, J. H. & Torres, N. 1976. Mineral exploration in the Tapira complex, Minas Gerais, Brazil. *In: International Symposium on Carbonatites*. Poços de Caldas, Minas Gerais. 50p.

IEDE – Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais de Minas Gerais. MG Mesorregiões IBGE Julho 2015. Disponível em: <http://iede.fjp.mg.gov.br/catalogo.html>. Acessado em: 13 de julho de 2021.

Lapin, A.V., Iwanuch, W. & Ploshko, V.V. 1999. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*. **29**: 483-490.

Machado, William Gladstone de Freitas. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. 2007. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 155 p.

Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 2011. *Plano Nacional de Mineração 2030*. Brasília. Vol. 1, 178 p.

Pereira, W.L. 2009. *Análise de estabilidade da pilha de estéril do Correia - Mina de Gongo Soco - para implantação da Ferrovia Estrada de Ferro Vitória Minas - EFVM*. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 121 p.

Petronilho, M.R. 2010. *Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco*. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 137 p.

Reis, R. C. 2010. *Estudo de estabilidade de talude da mina de Tapira - MG*. Dissertação de mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 95 p.

Rodrigues, C. de S. & Lima, P. R. A. S. 1984. *Complexos carbonatíticos do Brasil: geologia*. São Paulo: CBMM - Departamento de Geologia, p. 1-17.

Robertson, A. MacG., Steffen & Kirsten. 1985. *Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological*. Vancouver, Canadá. Vol. 1, 24p.

Santos, R.L.C, Sobral, L.G.S., Araújo, R.V.V. e Equipe Técnica da Fosfértil/CMT. 2002. Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfértil. *In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa (ENTMME)*. Recife, Pernambuco. 8p.

Silva, Ana. P. M., Viana, João P., Cavalcante, André L. B. 2012. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas. Brasília. *Instituto de Pesquisa Econômica aplicada*. 46p.

Silva, Carlos H., Simões, Luiz S.A., Dazámo, Leonardo W., Ferreira, Samuel N., Luvizotto, George L. 2012. O Grupo Canastra em sua área-tipo, região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais. *Revista do Instituto de Geociências - USP*. **12**: 83-98.

Valeriano, C.M. 1999. *A faixa Brasília meridional com ênfase no segmento da Represa de Furna: Estado atual do conhecimento e modelos de evolução tectônica*. Tese (Livre-Docência), Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 90p.

Valeriano, C. M.; Machado, N.; Simonetti, A.; Valladares, C. S; Seer, H. J.; Simões, L.S.A. 2004a. U-Pb geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West Gondwana. *Precambrian Research*. **130**: 27-55.

Victorino, H.S. 2016. *Análise de deformação em pilhas de disposição de estéril (NWI, W e SIV) no complexo minerador de Carajás com uso de dados stripmap do satélite TerraSAR-X*. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 118 p.

Vieira, M. A. de M. 1997. *Complexo alcalino de Tapira, Minas Gerais: mineralogia e geoquímica da distribuição de terras raras no perfil de intemperismo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte. 95 p.

Walm. 2019. Relatório Técnico do Estudo de Alternativa da Pilha de Disposição de Titânio – T6, WBH122-17-MOSC081-RTE-0002. Tapira. Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. 34p.

Walm. 2019. Relatório Técnico do Projeto Conceitual da Pilha de Disposição de Titânio – T6, WBH122-17-MOSC081-RTE-0003. Tapira. Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. 38p.

Walm. 2021. Relatório Técnico do Projeto Executivo da Pilha de Disposição de Titânio – T6, WBH12217167-1-GT- RTE-0003. Tapira. Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. 56p.