



**LARISSA SILVEIRA BERNARDES  
LUARA CARLA ROCHA DE FREITAS**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM  
EMPILHAMENTO DRENADO**

**LAVRAS – MG  
2022**

**LARISSA SILVEIRA BERNARDES  
LUARA CARLA ROCHA DE FREITAS**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM EMPILHAMENTO  
DRENADO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de bacharel.



Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Bernardes, Larissa Silveira; Freitas, Luara Carla Rocha de.  
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM  
EMPILHAMENTO DRENADO / Larissa Silveira Bernardes, Luara  
Carla Rocha de Freitas - 2022.  
36 p. : il.

Orientador(a): Eduardo Souza Cândido.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2022.  
Bibliografia.

1. Pilha de rejeito. 2. Métodos determinísticos. 3. Análise de  
estabilidade. I. Cândido, Eduardo Souza. II. Título.

**LARISSA SILVEIRA BERNARDES  
LUARA CARLA ROCHA DE FREITAS**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM EMPILHAMENTO  
DRENADO**

**SLOPE STABILITY ANALYSIS OF A DRAINED STACKING**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de bacharel.

APROVADO em 16 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido - UFLA

Prof<sup>a</sup>. Dra. Natalia Assunção Brasil Silva - UFSJ – Campus Alto Paraopeba - MG

Me. Vinícius de Lima Rodrigues - PROGEN – Conselheiro Lafaiete - MG

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente à Deus que sempre esteve ao nosso lado nos encorajando, guiando e nos permitindo chegar até aqui.

Às nossas famílias por toda dedicação, por não medirem esforços ao longo dessa caminhada, por se dedicarem, nos apoiarem e viverem conosco a conquista desse sonho, sem eles nada disso seria possível!

Agrademos também à Universidade Federal de Lavras por todo o suporte, por nos proporcionar as oportunidades e a estrutura necessária para nosso desenvolvimento profissional e pessoal durante todo o período da graduação.

Aos nossos professores agradecemos por todo aprendizado que nos foi passado, que tanto contribuíram em nossa jornada, e se hoje chegamos até aqui foi porque seguimos os seus ensinamentos e as experiências que adquirimos ao longo do caminho.

Em especial, nós agradecemos ao professor Dr. Eduardo Cândido, que além de nos transmitir todo o conhecimento durante suas aulas ao longo da graduação, foi nosso orientador neste trabalho, sendo essencial na sua construção. Obrigada pela orientação, dedicação e paciência durante esta etapa.

Agradecemos também aos nossos amigos e colegas que estiverem ao nosso lado durante o percurso, fazendo com que os desafios e obstáculos ficassem mais leves.

Por fim, agradecemos a todos que estiverem presentes ao longo desses anos contribuindo de forma direta ou indireta para a concretização desse sonho!

## RESUMO

A análise de estabilidade é de extrema importância para a segurança de pilhas de rejeito. Os métodos determinísticos baseados nos métodos do equilíbrio limite da massa de solo foram utilizados para analisar a estabilidade comparando o fator de segurança dos métodos de Bishop, Morgenstern-Price e Spencer. Este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade de taludes de um empilhamento drenado localizado em Minas Gerais utilizando a versão teste gratuita do software Slope/W. Foram escolhidas duas seções levando em consideração a maior inclinação da pilha para analisar o local mais crítico. Entrando com os dados dos solos que compõem a pilha, variando as alturas do nível de água e com a ajuda de um medidor de água foi possível criar um parâmetro de alerta de estabilidade da pilha. Como esperado quanto mais alto o nível da água, menor o fator de segurança. Contudo, foi possível facilitar o monitoramento da pilha e também aumentar a segurança para os trabalhadores e moradores da região.

**Palavras-chave:** Pilha de rejeito. Métodos determinísticos. Análise de estabilidade.

## **ABSTRACT**

The stability analysis is extremely important for the safety of tailings piles. Deterministic methods based on soil mass boundary equilibrium methods were used to analyze stability comparing the safety factor of Bishop, Morgenstern-Price and Spencer methods. This work aimed to analyze the slope stability of a drained pile located in Minas Gerais using the free trial version of the Slope/W software. Two sections were chosen taking into account the steepest slope of the pile to analyze the most critical location. By entering the data of the soils that make up the pile, varying the heights of the water level and with the help of a water meter, it was possible to create a pile stability alert parameter. As expected, the higher the water level, the lower the safety factor. However, it was possible to facilitate the monitoring of the pile and also increase safety for workers and residents of the region.

**Keywords:** Tailings pile. Deterministic methods. Stability analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Superfície de ruptura circular abaixo (a) e acima (b) do pé do talude.....	13
Figura 2 - Fatia genérica do método de Bishop.....	15
Figura 3 - Forças atuantes em uma fatia infinitesimal pelo método de Morgenstern and Price (1965). ....	16
Figura 4 - Método de Spencer (1967) – Forças aplicadas a uma fatia de solo.....	17
Figura 5 - Determinação do fator de segurança.....	17
Figura 6 – Localização da pilha.....	19
Figura 7 - Curvas de nível. ....	21
Figura 8 - Locação das seções. ....	21
Figura 9 - Seções críticas da pilha (a) Seção AA e (b) Seção BB.....	22
Figura 10 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price (1965)– Posição 1 da linha freática. ....	24
Figura 11 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 2 da linha freática. ....	25
Figura 12 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 3 da linha freática. ....	25
Figura 13 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 1 da linha freática. ....	26
Figura 14 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 2 da linha freática. ....	26
Figura 15 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 3 da linha freática. ....	26
Figura 16 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 1 da linha freática. ....	27
Figura 17 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 2 da linha freática. ....	27
Figura 18 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 3 da linha freática. ....	28
Figura 19 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 1 da linha freática. ....	28
Figura 20 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 2 da linha freática. ....	29
Figura 21 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 3 da linha freática. ....	29
Figura 22 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 1 da linha freática. ....	30
Figura 23 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 2 da linha freática. ....	30
Figura 24 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 3 da linha freática. ....	30
Figura 25 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 1 da linha freática. ....	31
Figura 26 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 2 da linha freática. ....	31
Figura 27 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 3 da linha freática. ....	31



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Atividade Mineradora .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Empilhamento Drenado .....</b>	<b>11</b>
<b>2.3</b>	<b>Estabilidade de taludes de empilhamentos drenados .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Teoria do Equilíbrio Limite .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Método de Bishop .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Método de Morgenstern-Price.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Método de Spencer .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Carta de risco .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Localização e características da pilha de rejeito.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Parâmetros Geotécnicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3</b>	<b>Curvas de nível e seções críticas .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise de estabilidade .....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Carta de Risco .....</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial para a economia brasileira, visto que as atividades de produção mineral são responsáveis por 20,5% das exportações e 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil (MME, 2019). No entanto, conforme explica Soares (2010), essas atividades produzem um volume significativo de rejeito de mineração, que são descartados nos processos de lavra e beneficiamento. Diante disso, esse material rejeitado pode ser disposto na forma de barragens ou pilhas, buscando sempre atender às exigências de proteção ambiental e de segurança de forma a evitar acidentes, que tanto despertam a atenção da comunidade técnico-científica quanto das autoridades governamentais.

De acordo com Souza (2020), tradicionalmente, rejeito e estéril são dispostos em barragens e em pilhas, respectivamente. Neste contexto, dois trágicos acidentes, que foram os rompimentos das barragens de Mariana - MG e Brumadinho - MG, totalizaram cerca de 290 mortes como também um imensurável dano ambiental. Diante destes e de outros casos envolvendo acidentes com barragens de mineração no Brasil, a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019) estabeleceu o descomissionamento de 61 barragens de rejeito por serem consideradas de alto risco. Segundo Carvalho (2022), o uso de métodos alternativos de disposição de rejeitos, como o empilhamento drenado, consideradas estruturas de aterro, tem ganhado atenção e prestígio no âmbito da mineração. Assim, essas estruturas estão sendo adotadas como alternativa mais segura à disposição de rejeitos de mineração. Entretanto, mesmo elas sendo mais estáveis que as tradicionais barragens, não se descartam os riscos de virem a entrar em colapso em algum momento de sua vida útil.

Souza (2020) destaca as pilhas de disposição de rejeito filtrado e de co-disposição como soluções promissoras na atualidade, pois não geram reservatórios de água, o que reduz consideravelmente as consequências de uma eventual ruptura. Carvalho (2022) salienta que existem muitas causas de acidentes com pilhas de rejeito, como por exemplo os problemas advindos da erosão e da falta de monitoramento do sistema de drenagem. Logo, é de suma importância que estudos voltados para a análise de estabilidade e integridade dessas estruturas sejam feitos.

Atualmente as análises determinísticas, que são baseadas na teoria do equilíbrio limite, tem sido muito utilizadas como forma de estudar a estabilidade de taludes das pilhas de rejeito. Este tipo de análise se baseia nos materiais geotécnicos que compõem a pilha, fornecendo fatores de segurança que indicam o grau de segurança que a estrutura apresenta (VECCI, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade de taludes de um empilhamento drenado através de métodos determinísticos, que determinarão o grau de segurança que a estrutura possui, como também obter uma carta de risco que auxilia em sua operação. Nesta análise, procura-se obter o fator de segurança (FS) crítico, que conforme Silva (2011), indica o quão seguro a pilha está, e assim evitando que venha apresentar algum tipo de ruptura ao longo de sua superfície, seja ela plana, circular, poligonal ou mista.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Atividade Mineradora**

As atividades relacionadas à produção mineral produzem um volume significativo de rejeito de mineração, que é descartado nos processos de lavra e beneficiamento. A disposição desses materiais rejeitados, à semelhança daqueles resultantes de atividades industriais, urbanas ou de pesquisas nucleares, é, na atualidade, um contratempo à indústria mineral (SOARES, 2010). Ainda, segundo Soares (2010), a crescente geração de rejeitos tem levado a um grande aumento das estruturas armazenadoras, que tem como requisito básico segurança da obra, facilidade de operação e viabilidade econômica.

Moreira (2021) afirma que o empilhamento drenado é um método alternativo de disposição de rejeitos que está ganhando força após os recentes rompimentos de barragens.

### **2.2 Empilhamento Drenado**

Empilhamento drenado é uma estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido, podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

O método de empilhamento drenado destaca-se como um detalhamento na engenharia dos rejeitos, quanto às características granulométricas e permeabilidade adequadas e controladas durante toda a sua vida útil, para que a livre drenagem ocorra, permitindo que a estrutura esteja em condições não saturadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

A disposição de rejeitos das usinas de beneficiamento de minério pode ser realizada por diversos métodos, tais como: barragens de contenção de rejeitos com disposição subaérea, subaquática, rejeitos espessados, rejeitos filtrados; aterro hidráulico; empilhamento drenado; disposição em cava; co-disposição de rejeitos e estéreis e; disposição compartilhada de rejeitos e estéreis (ALVES, 2015).

A forma com que o processo da formação desses empilhamentos é realizado, é semelhante aos alteamentos à montante de barragens, estando a diferença na granulometria dos materiais envolvidos.

O rejeito filtrado é uma nova abordagem promissora que surgiu tendo característica de não precisar de barramento, sendo atualmente comercialmente viável para as operações nas minas e com diversas aplicações ao redor do mundo (WICKLAND e LONGO, 2017). O rejeito filtrado consiste em um material de descarte resultante da lavra do qual se retira água por meio de filtração mecânica ou a vácuo, com o objetivo de acelerar a consolidação desse material (LUPO e HALL, 2010).

Gomes (2019) aponta a diferença entre o sistema de empilhamento drenado e de barragem de contenção. No empilhamento não há acúmulo de água na parte interna da estrutura, pois há um eficiente sistema de drenagem no interior e no fundo que garante o fluxo gravitacional de água ao longo da disposição de rejeito e períodos de chuva. Ressalta ainda que, a estrutura pode ser dotada de extravasores e sistemas de captação de água para que em épocas de precipitações intensas a água seja removida com maior eficiência. Esse sistema de drenagem é dimensionado para captação de água de chuva, nascentes, curso d'água e da água efluente da polpa de rejeito.

### **2.3 Estabilidade de taludes de empilhamentos drenados**

Os taludes ou encostas naturais são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, originados por processos geológicos, geomorfológicos e ações antrópicas. Talude artificial se refere ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens, incluindo rejeitos industriais, urbanos ou de mineração. (JUNIOR, 2005).

De acordo com a NBR 11.682 (ABNT, 2009), os taludes são definidos como estruturas inclinadas, sendo constituídas de solos e/ou rochas, materiais de construção heterogêneos que, quase sempre, são analisados pelos métodos determinísticos. Neste contexto, busca-se através de análise computacional, a garantia da estabilidade dos taludes, conforme explica Souza (2018). Estas análises tem como objetivo retornar a superfície de ruptura relacionada ao menor FS.

Análises determinísticas são as análises de estabilidade de materiais geotécnicos que fornecem Fatores de Segurança obtidos por meio de cálculos que utilizam os valores médios dos parâmetros (VECCI, 2018). A definição clássica do FS corresponde à resistência ao cisalhamento que deve ser reduzida conduzindo a massa do solo para um estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície de deslizamento (SANDOVAL, 2012).

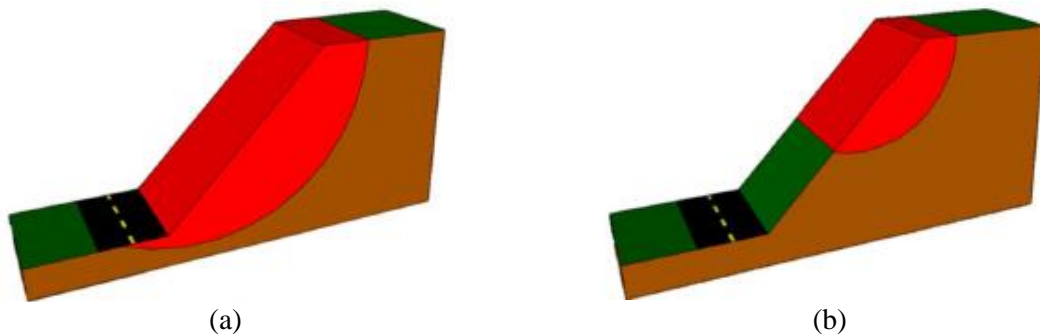
Ainda, segundo Vecci (2018), desenvolveram-se métodos para realização desses cálculos, entre eles estão os métodos de equilíbrio limite registrados na literatura para o alcance do FS. Estes métodos são conhecidos também como Métodos das Fatias, pois, como inicialmente proposto por Fellenius (1927, 1936), são baseados no equilíbrio estático de cada fatia que compõem a massa total de solo acima da superfície definida como superfície de ruptura potencial.

### 2.3.1 Teoria do Equilíbrio Limite

Segundo Souza (2019), para analisar a estabilidade de estruturas de solo, como encostas, barragens de terra, aterros e barragens de rejeitos, a Teoria do Equilíbrio Limite é comumente utilizada.

A Teoria do Equilíbrio Limite serve de base para os métodos de análise de estabilidade mais conhecidos na literatura e é utilizada para determinar o equilíbrio de uma massa de solo cuja ruptura possa ocorrer ao longo de uma superfície plana, circular, poligonal ou mista (SILVA, 2011). A Figura 1 mostra exemplos de superfície de ruptura circular passando acima ou abaixo do pé do talude.

Figura 1- Superfície de ruptura circular abaixo (a) e acima (b) do pé do talude.



Fonte: Souza (2019).

Essa massa de solo acima da superfície de deslizamento é considerada como um corpo livre, admitindo-se que todas as partículas ao longo da linha de ruptura atingiram a condição de  $FS = 1$ . Desta forma, embora não seja totalmente verdadeiro, assume-se que o fator de segurança é o mesmo em todos os pontos (SILVA, 2011).

Duncan e Wright (1980), salientam que essa teoria é amplamente utilizada no dimensionamento de taludes de encostas ou escavações, mas a garantia dessa análise depende

de alguns parâmetros, como a precisão com que a geometria das camadas de solo pode ser definida e na exatidão das propriedades de resistência do solo determinadas por outros ensaios, além da precisão inerente do método de análise escolhido.

É comum que se faça a análise da estabilidade de um talude, utilizando essa teoria, em duas dimensões. Isso faz com que não sejam levados em conta efeitos de confinamento lateral. Como a linha de ruptura pode variar ao longo do talude, considera-se então a seção mais crítica, que pode ser a mais alta ou de maior inclinação, por exemplo (GERSCOVICH, 2013).

Segundo Silva (2011) o FS pode ser obtido através do equilíbrio de forças, de momentos e da resistência ao cisalhamento, mas a maioria dos métodos baseados nesta teoria obtém seu FS através do equilíbrio de momentos.

Duncan e Wright (1980) ressaltam que dentre os métodos que usam algumas ou todas as equações de equilíbrio para o cálculo do FS, aqueles que usam de todas as equações tendem a apresentar FS similares, com uma margem de erro de até 5,0%.

Souza (2019) explica que os autores explanam que a Teoria do Equilíbrio Limite pode ser aplicada a vários tipos de análise, comumente através de uma abordagem generalizada, utilizando-se de fatias ou de blocos. Ao adotar a divisão em fatias, divide-se a massa de solo em porções verticais, chamadas lamelas. Estas fatias são consideradas de forma isolada para determinar seu equilíbrio. Gerscovich (2016, p. 78) afirma que este equilíbrio é calculado pelas equações da estática. Já o equilíbrio de forças é obtido através da análise do equilíbrio de cada fatia. O equilíbrio de momentos é feito comparando o somatório dos momentos estabilizantes e instabilizantes, e a tensão cisalhante mobilizada é uma das incógnitas do problema. Ao comparar o número de incógnitas e equações, o problema se torna estaticamente indeterminado por apresentar o número de incógnitas maior que o de equações. Para resolver essa situação, vários métodos de cálculo foram propostos, com o objetivo de reduzir as incógnitas e tornar o problema estaticamente determinado.

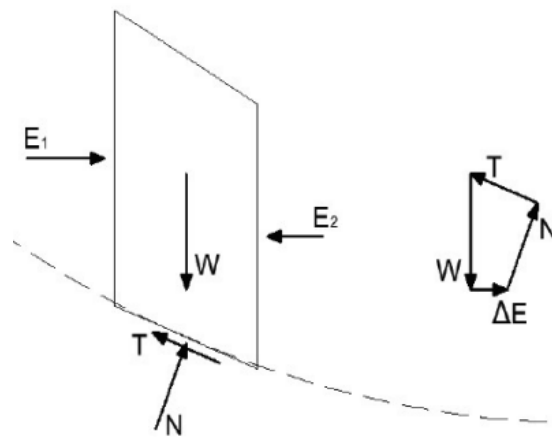
### **2.3.2 Método de Bishop**

No método desenvolvido por Bishop em 1955, a interação entre as lamelas é levada em consideração. O equilíbrio de momentos é então calculado de forma a se encontrar o fator de segurança através de um processo iterativo, conforme mostrado na Equação 1 (SOUZA, 2019).

$$FS = \frac{\sum [c' x b + (W x (1 - r_u) + (E_{n+1}) - E_n)) x \tan \phi'] x \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' x \tan \alpha}{FS}}}{\sum W x s e n \alpha} \quad (1)$$

Apesar de ter sido desenvolvido primariamente para analisar superfícies circulares, o método de Bishop (1955), pode ser aplicado em superfícies poligonais, gerando resultados satisfatórios (SILVA, 2011). Souza (2019), explica que esse método satisfaz, para uma massa de solo dividida em N fatias, N+1 condições de equilíbrio enquanto apresenta apenas N+1 desconhecidos como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Fatia genérica do método de Bishop.



Fonte: Silva (2011).

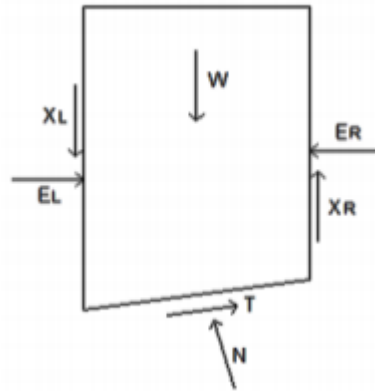
Apesar de não satisfazer todas as condições de equilíbrio, o método de Bishop (1955) apresenta resultados tão precisos quanto outros métodos que utilizam todas as equações de equilíbrio para determinar o fator de segurança. Assim, este procedimento pode ser considerado simples e eficaz para analisar superfícies de deslizamento circulares (DUNCAN; WRIGHT, 1980).

### 2.3.3 Método de Morgenstern-Price

Por cumprir todas as condições de equilíbrio, Silva (2011) considera o método de Morgenstern-Price (1965) rigoroso mesmo sendo mais simples que outros procedimentos como o de Janbu. Nele são consideradas as forças normais e cisalhantes entre fatias como mostra a Figura 3.



Figura 3 - Forças atuantes em uma fatia infinitesimal pelo método de Morgenstern and Price (1965).



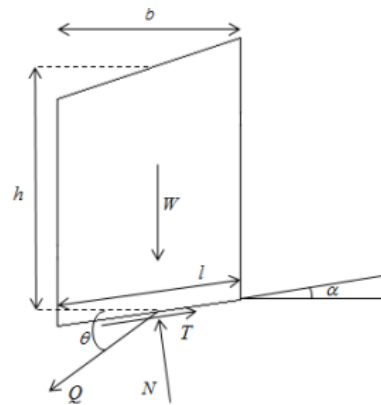
Fonte: Silva (2013).

As forças de interação entre as fatias de largura infinitesimal são aproximadas por uma função,  $f(x)$ , que é multiplicada por um fator adimensional,  $\lambda$ , especificado previamente (SOUZA, 2019). De acordo com Silva (2011), caso esta função adotada seja constante, este método apresenta resultado semelhante ao de Spencer (1967), mas caso apresente função nula os resultados apresentam valores idênticos ao de Bishop (1955).

### 2.3.4 Método de Spencer

O método de Spencer, apresentado em 1967, é considerado como sendo um método rigoroso uma vez que satisfaz todas as equações de equilíbrio (forças e momentos) (FERREIRA, 2012). O fator de segurança é assim representado pelo ponto que satisfaz simultaneamente os dois equilíbrios (SILVA, 2013). Segundo Ferreira (2012), uma resultante  $Q$  estaticamente equivalente substitui as forças de interação entre fatias, atuando no ponto médio da base da respectiva fatia, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Método de Spencer (1967) – Forças aplicadas a uma fatia de solo.



Fonte: Ferreira (2012).

Ferreira (2012) aponta a resultante  $Q$  como resultado da manipulação das equações de equilíbrio, que tem a seguinte forma, conforme mostra Equação 2:

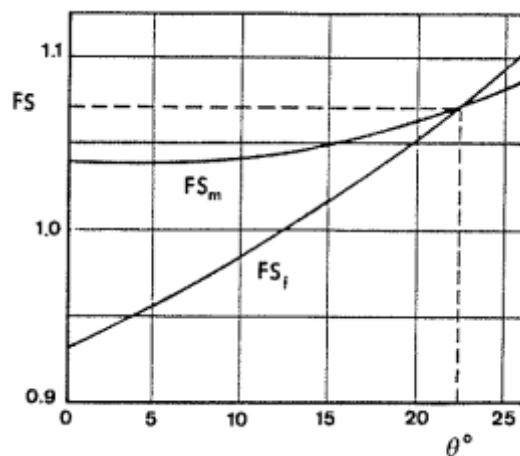
$$Q = \frac{c'xl}{FS} + \frac{W \cos \alpha - uxl \tan \phi'}{FS} - W \sin \alpha \quad (2)$$

$$\cos(\alpha - \theta) \times \left( 1 + \frac{\tan \phi' \times \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right)$$

em que  $\theta$  é a inclinação da resultante  $Q$  em cada fatia.

O processo para obtenção da solução final passa por arbitrar vários valores de  $\theta$  e para cada um determinar o fator de segurança para o equilíbrio de forças (FS<sub>f</sub>) e equilíbrio de momentos (FS<sub>m</sub>) (SILVA, 2013). Com os valores obtidos traça-se as curvas FS<sub>f</sub> e FS<sub>m</sub> com  $\theta$  e onde se der a interseção corresponde ao valor de FS (FERREIRA, 2012) como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Determinação do fator de segurança.



Fonte: Ferreira (2012).

O uso do método de Spencer (1967) tornou-se comum à medida que a tecnologia computacional melhorava. Por outro lado, o seu cálculo completo a mão, tal como todos os métodos rigorosos, é pouco exequível devido a sua complexidade (SILVA, 2013).

## 2.4 Carta de risco

De acordo com Ribeiro e Espósito (2016), a carta de risco se trata de um documento que auxilia na operação da pilha de rejeito, como também orienta o acompanhamento do funcionamento dessas estruturas e verifica sua segurança. A carta de riscos estabelece níveis de segurança aceitáveis que orientam na definição do grau de perigo em possíveis situações de emergência, auxiliando nas tomadas de decisões. Cada grau de segurança corresponde a um intervalo de fator de segurança que, normalmente, representa a estabilidade global da estrutura em termos de sua resistência. Para o estabelecimento dos níveis da carta de segurança é adotado como critério a variação do fator de segurança, em função da resistência dos taludes do empilhamento drenado, geralmente avaliada por meio de análises de estabilidade. Os medidores de nível d'água são os principais instrumentos contemplados na elaboração da carta de riscos, sendo responsáveis por indicar a posição da linha freática e conseqüentemente o nível de alerta.

A NBR 13029 (ABNT, 2017) fornece fatores de segurança mínimos para pilhas de estéril, que embora não inclua requisitos específicos para pilhas de rejeito, são utilizados como parâmetro para elaboração da carta de risco, como indicados na Tabela 1, já que na literatura não há norma que se restrinja às pilhas de rejeito.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos de ruptura geral de taludes.

<b>Superfície freática</b>	<b>Fator de Segurança Mínimo</b>
Superfície freática normal	1,5
Superfície freática crítica	1,3

Fonte: NBR 13029 (ABNT, 2017).

Ainda conforme a NBR 13029 (2017), superfície freática normal é definida como aquela que admite condições de funcionamento normal da drenagem interna, já a crítica indica condições críticas de estabilidade e de não funcionamento da drenagem.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e características da pilha de rejeito

Os estudos foram realizados nos taludes de um empilhamento drenado de uma empresa de mineração localizada na cidade de Congonhas, Estado de Minas Gerais como mostra a Figura 6.

Neste tópico serão apresentados dados referentes a pilha de rejeito, que foram disponibilizados pela empresa de mineração, aqui denominada “Empresa X”. Por motivos de segurança da informação as referências não serão divulgadas neste documento.

Figura 6 – Localização da pilha.



Fonte: Empresa X (2022)

A pilha apresenta uma altura máxima de 27 metros e foi construída para disposição de rejeito oriundo do processo de extração de minério até a elevação de 966,00 m. O sistema de drenagem desta pilha consiste em drenos lineares escavados na camada de disposição de material já lançado com espessura entre 1,50 m e 2,00 m. Os drenos serão revestidos de geotêxtil e com o núcleo de brita 2. No topo dos drenos deverão ser executadas transições de brita 0 e areia.

Para monitorar o nível d'água, oriunda da drenagem do rejeito e das infiltrações de água de chuva, serão instalados 3 (três) medidores de nível d'água no corpo da pilha, sendo o medidor 1 o mesmo para as duas seções e o medidor 2 distintos em cada seção. Com estes instrumentos

será possível avaliar a capacidade do sistema de drenagem e obter o nível de água. Na Tabela 2 estão apresentadas as principais características da pilha de rejeito.

Tabela 2- Características da pilha de rejeito.

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultados</b>
Elevação máxima da crista (m)	966,00
Altura máxima (m)	27,00
Material da pilha	Rejeito semicompactado
Área da pilha (m <sup>2</sup> )	55900,00

Fonte: Adaptado da Empresa X (2022).

### 3.2 Parâmetros Geotécnicos

Através de sondagem mista, percussão em solo e rotativa em rocha, amostras de solo deformadas foram coletadas, e através de 3 poços de inspeção foram coletados blocos de amostras indeformados para realização de ensaios especiais em laboratório a fim de definir os parâmetros de resistência dos materiais.

A empresa X, responsável pelo estudo geológico-geotécnico da fundação da pilha disponibilizou uma planilha com os dados do solo. Camadas de saprolito de filito, solo residual de filito, colúvio e rejeito são responsáveis por compor a pilha de rejeito em estudo. Na tabela 3 são apresentados os parâmetros de resistência de cada um dos materiais citados, peso específico saturado ( $\gamma$  sat), coesão ( $c'$ ) e ângulo de atrito ( $\phi'$ ).

Tabela 3 - Parâmetros de resistência.

<b>Material</b>	<b><math>\gamma</math> sat</b>	<b>Parâmetros de Resistência</b>	
	(kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)
Rejeito	20	0	34
Colúvio	17	10	25
Solo Residual de Filito	18	22	29
Saprolito de Filito	19	50	35

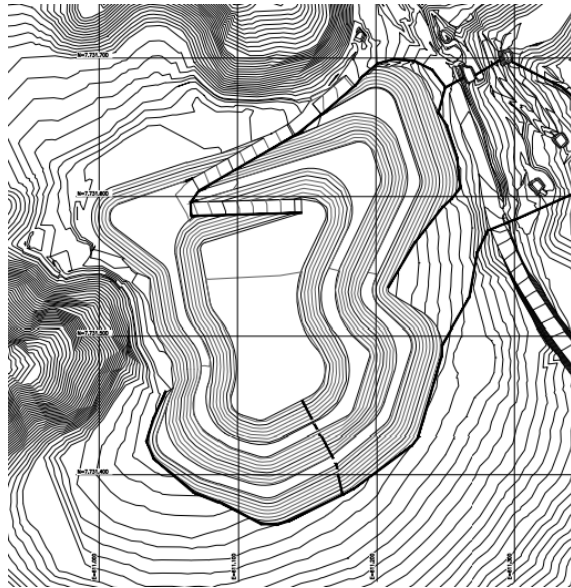
Fonte: Adaptado da Empresa X.

### 3.3 Curvas de nível e seções críticas

A análise de estabilidade de um talude está condicionada as características de sua topografia, como por exemplo altura, inclinação e superfície. A empresa X disponibilizou as

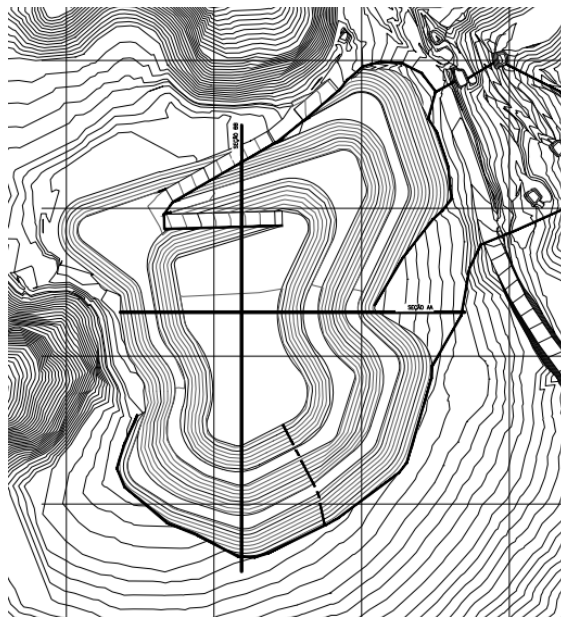
curvas de nível da pilha de rejeito em estudo, conforme apresentado na Figura 7. Diante disso, foram selecionadas duas seções de maior inclinação, como mostra a Figura 8, para a análise do problema, como forma de trabalhar a favor da segurança. Um talude com uma inclinação elevada está sujeito a maior movimentação de massa, sendo, portanto, importante realizar a análise de estabilidade nestas condições.

Figura 7 - Curvas de nível.



Fonte: Empresa X.

Figura 8 - Locação das seções.



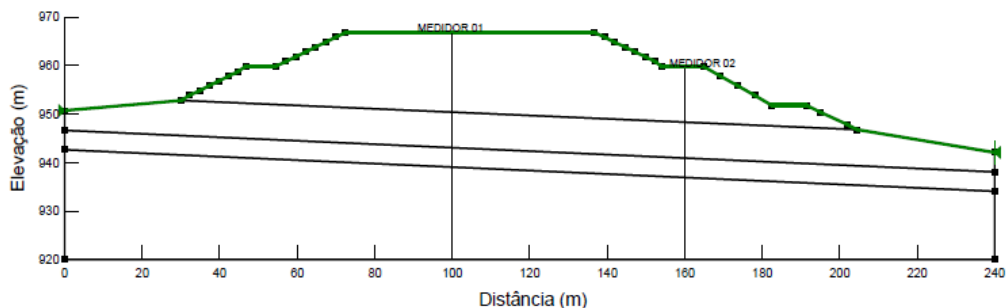
Fonte: Dos autores (2022).

### 3.4 Análise de estabilidade

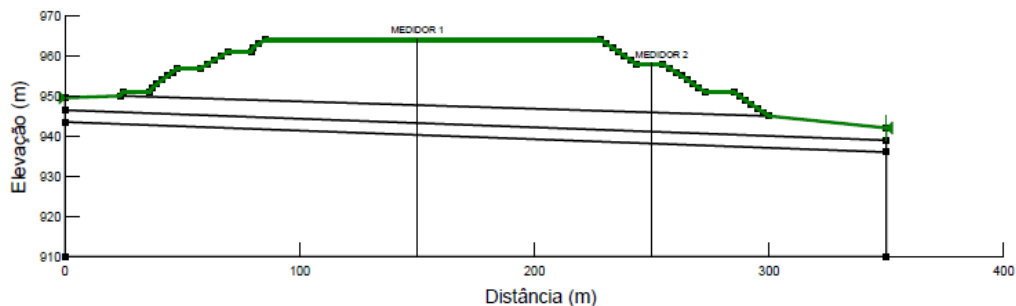
Os métodos determinísticos escolhidos para realização das análises de estabilidade foram Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967), considerados rigorosos por satisfazerem todas as condições de equilíbrio de momentos e forças, e o método de Bishop (1955), que satisfaz somente as equações de equilíbrio de forças verticais e de momentos. Através das curvas de nível, foram escolhidas as seções críticas e exportadas de um software tipo CAD (2022) para uma versão teste gratuita 2021.4 do software Slope/W da Geostudio. Foram feitas as análises determinísticas pelo método de entrada e saída, que especifica o local onde as superfícies de deslizamento provavelmente entrarão na superfície do solo e onde elas sairão.

No software fez-se a inserção das seções críticas, parâmetros do solo e altura do nível de água. Para cada uma das seções AA e BB, apresentadas na Figura 9, foram escolhidas 3 (três) alturas do nível de água afim de criar uma carta de risco através dos medidores para nível de emergência, alerta e normal da pilha.

Figura 9 - Seções críticas da pilha (a) Seção AA e (b) Seção BB



(a)



(b)

Fonte: Dos Autores (2022).

Desta forma, é apresentado na Tabela 4, um resumo do que será encontrado nos resultados.

Tabela 4 – Quadro resumo para os resultados determinísticos

Linha freática	1	2	3	1	2	3
Método	FS seção AA	FS seção AA	FS seção AA	FS seção BB	FS seção BB	FS seção BB
Bishop (1955)						
Morgenstern – Price (1965)				Fatores de segurança		
Spencer (4967)						

Fonte: Dos Autores (2022)

Os resultados dos fatores de segurança devem passar por uma análise de risco. Baseado nos valores mínimos de fator de segurança estabelecidos pela NBR 13029 (ABNT, 2017), e nos fatores de segurança encontrados, foi possível fazer a elaboração da carta de risco para a pilha de rejeito estudada.



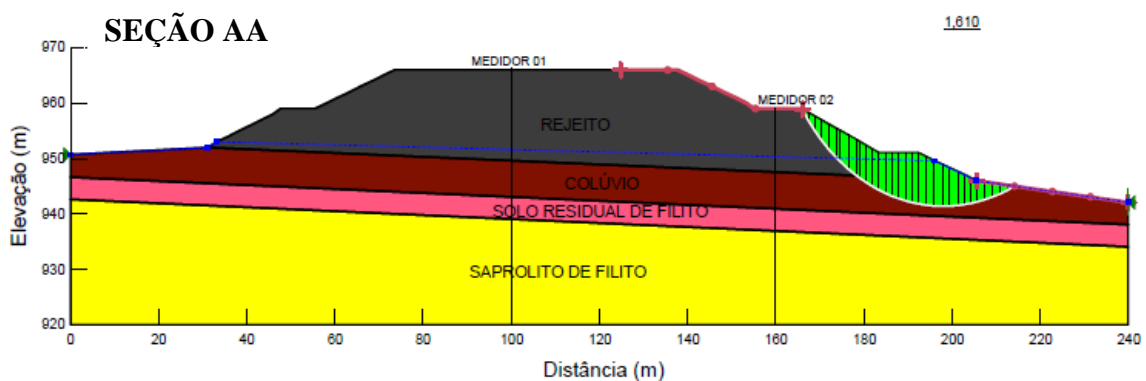
## 4 RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados das análises de estabilidade empregando métodos determinísticos para as 2 seções definidas, utilizando o método de entrada e saída no Slope/W que permite a determinação de uma superfície de ruptura, que deverá se encontrar na parte mais crítica da pilha de rejeito. A superfície foi dividida em 100 fatias que foram calculadas com um número máximo de 2000 interações e diferença tolerável de  $FS = 0,001$ .

Nas Figuras 10 a 27 estão representadas as seções críticas AA e BB da pilha com a linha piezométrica posicionada em posições diferentes. Junto das seções estão os fatores de segurança dispostos no canto superior direito, que são resultantes das análises de estabilidade realizadas empregando os métodos de Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Bishop (1955). Vale ressaltar, que à medida que a posição da linha piezométrica se altera, o fator de segurança também apresenta mudança em seus valores.

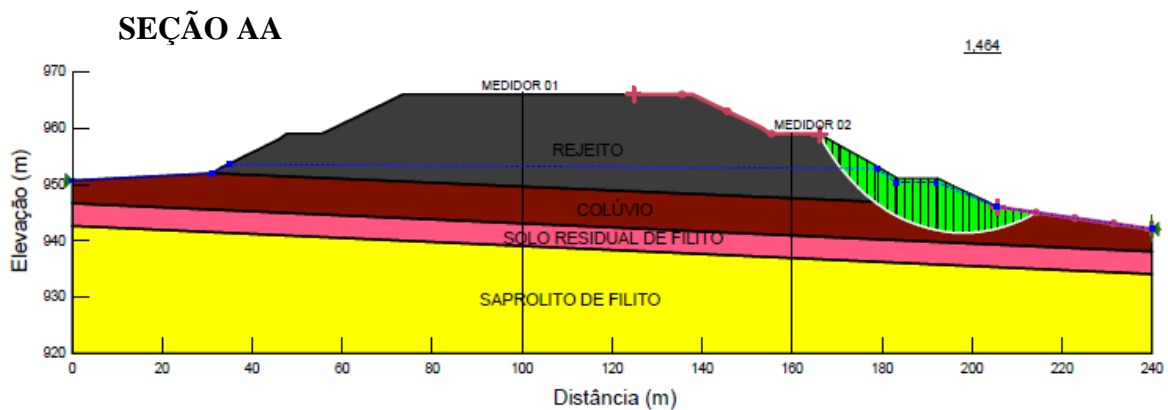
Nas Figuras 10, 11 e 12 estão representadas as seções AA, com os resultados da análise determinística por Morgenstern-Price (1965). Na figura 10 está representada a posição mais baixa da linha freática, na 11 a posição mediana e por último, na figura 12 a mais elevada.

Figura 10 - Resultados análises determinísticas seção por Morgenstern-Price (1965)– Posição 1 da linha freática.



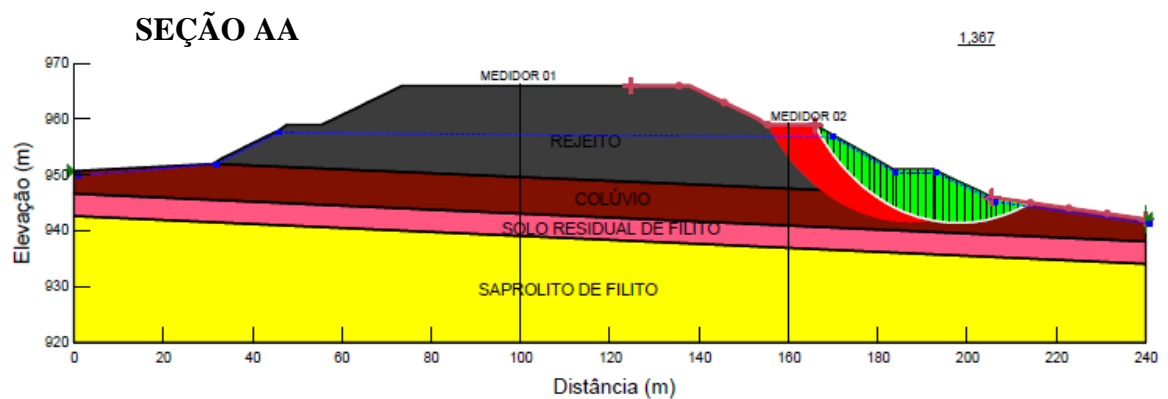
Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 11 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 2 da linha freática



Fonte: Dos Autores (2022).

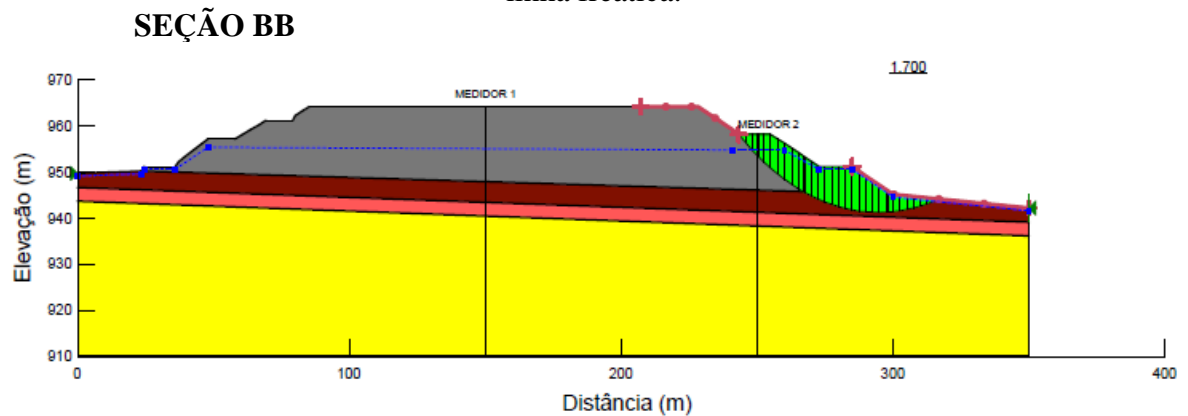
Figura 12 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 3 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

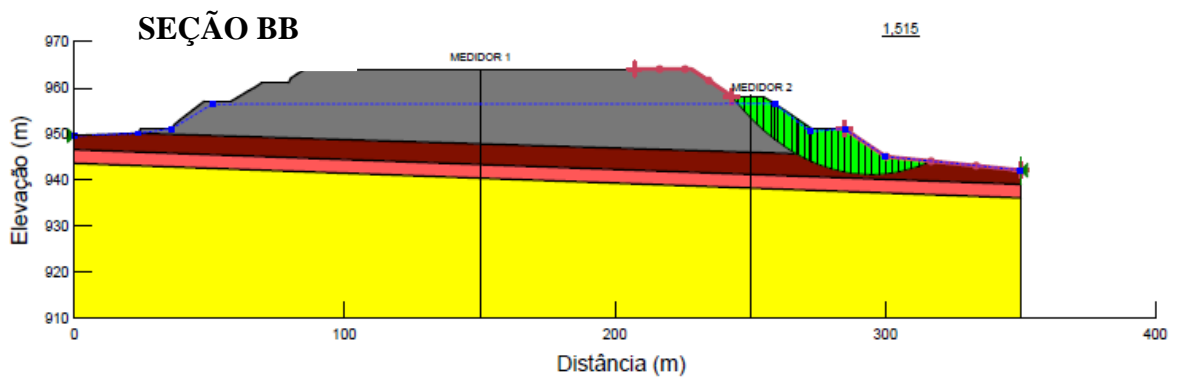
Nas Figuras 13, 14 e 15 estão representadas as seções BB, com os resultados das análises determinísticas por Morgerstern-Price (1965). Na Figura 13 está representada a posição mais baixa da linha, na 14 a posição mediana e por último, na figura 15 a mais elevada.

Figura 13 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 1 da linha freática.



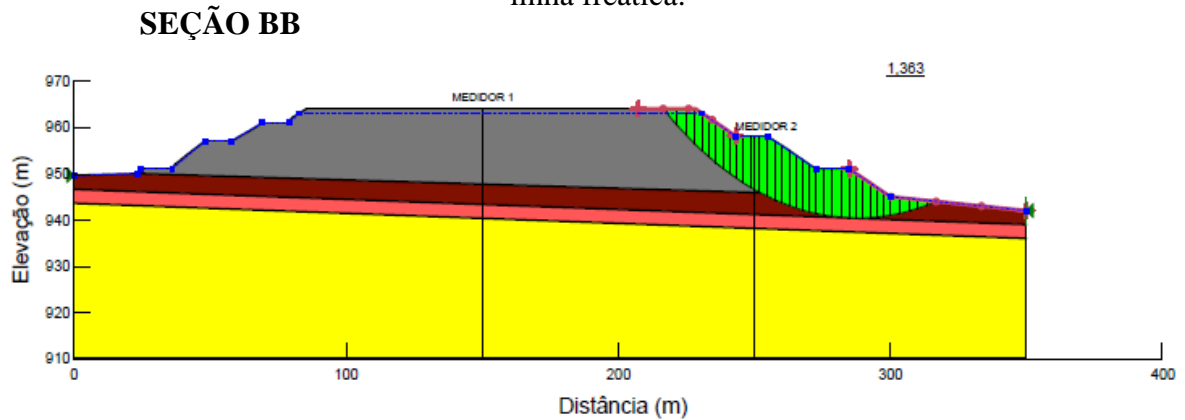
Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 14 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 2 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

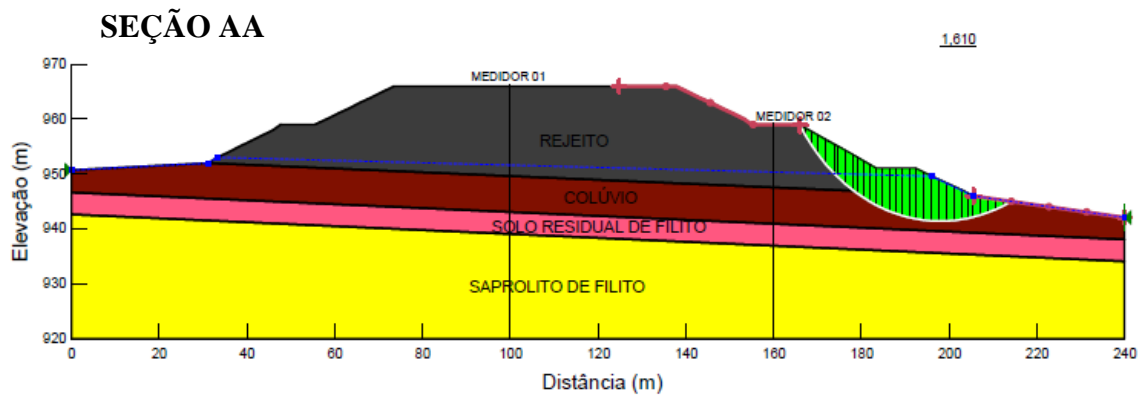
Figura 15 - Resultados análises determinísticas seção por Morgerstern-Price – Posição 3 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

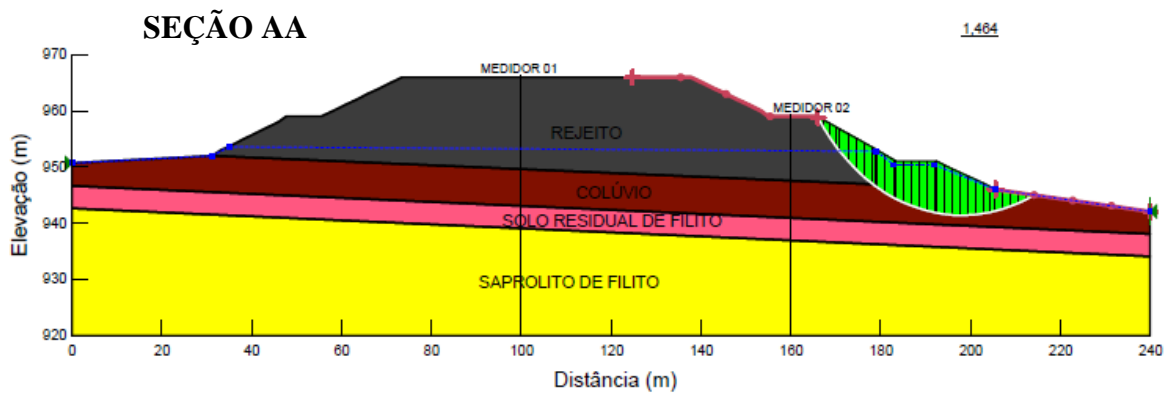
Nas figuras 16, 17 e 18 estão representadas as seções AA, com os resultados da análise determinística por Spencer. Na figura 16 está representada a posição mais baixa da linha, na 17 a posição mediana e por último, na figura 18 a mais elevada.

Figura 16 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 1 da linha freática.



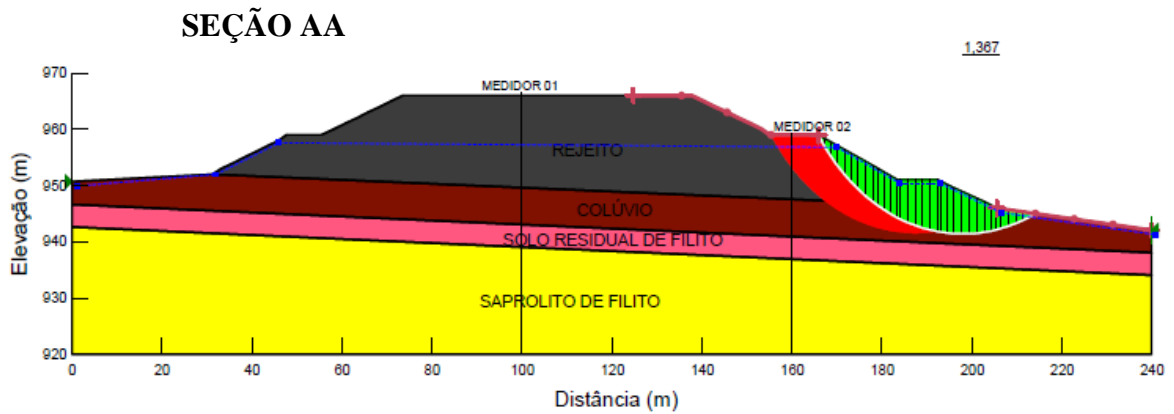
Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 17 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 2 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

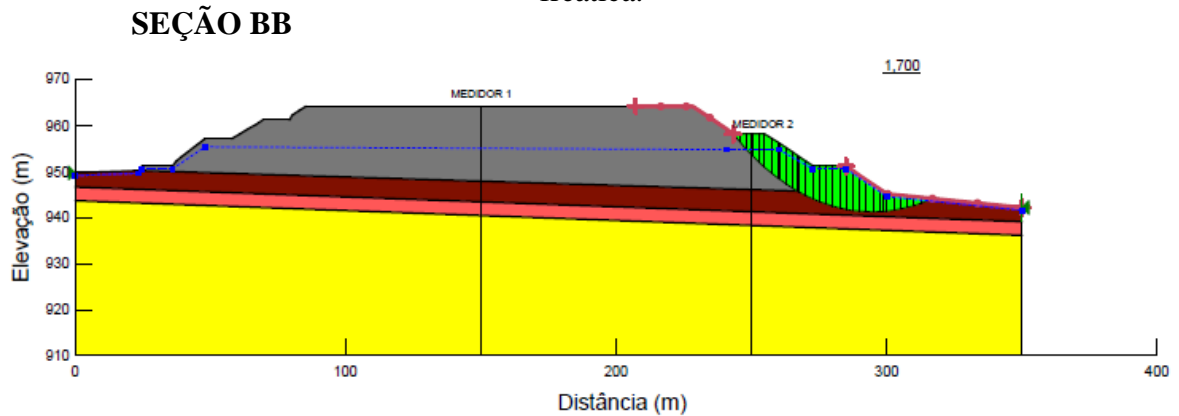
Figura 18 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 3 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

Nas figuras 19, 20 e 21 estão representadas as seções BB, com os resultados da análise determinística por Spencer. Na figura 19 está representada a posição mais baixa da linha, na 20 a posição mediana e por último, na figura 21 a mais elevada.

Figura 19 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 1 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 20 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 2 da linha freática.

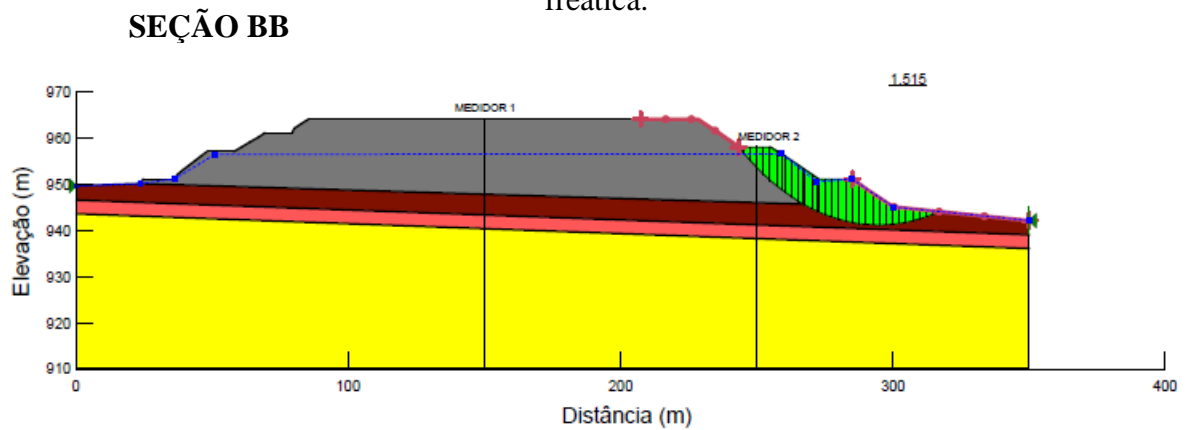
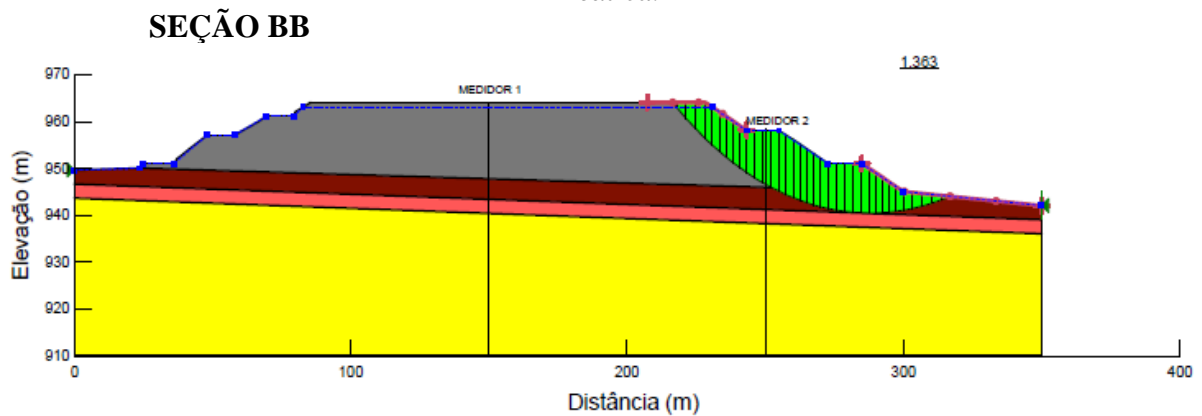
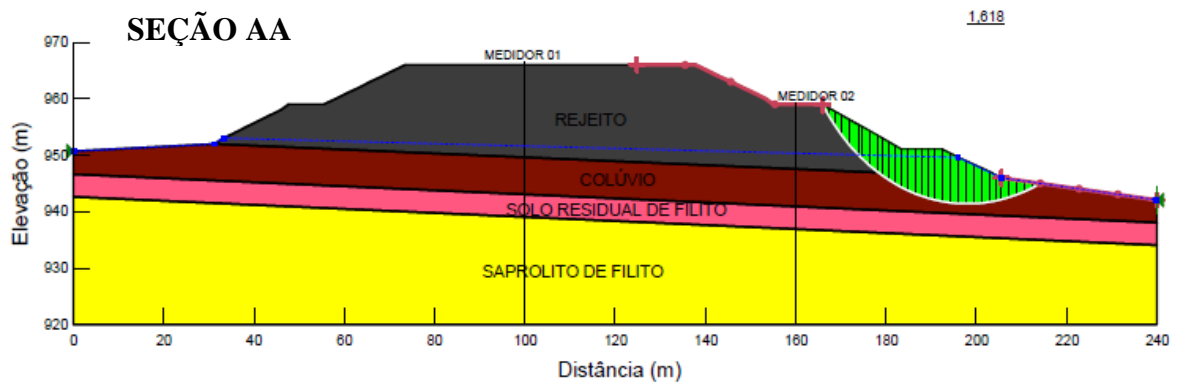


Figura 21 - Resultados análises determinísticas seção por Spencer – Posição 3 da linha freática.



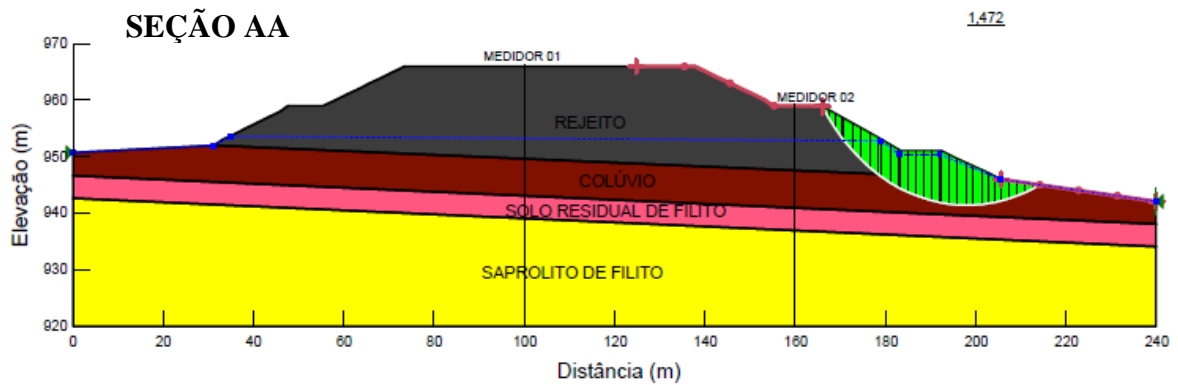
Nas figuras 22, 23 e 24 estão representadas as seções AA, com os resultados da análise determinística por Bishop. Na figura 22 está representada a posição mais baixa da linha, na 23 a posição mediana e por último, na figura 24 a mais elevada.

Figura 22 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 1 da linha freática.



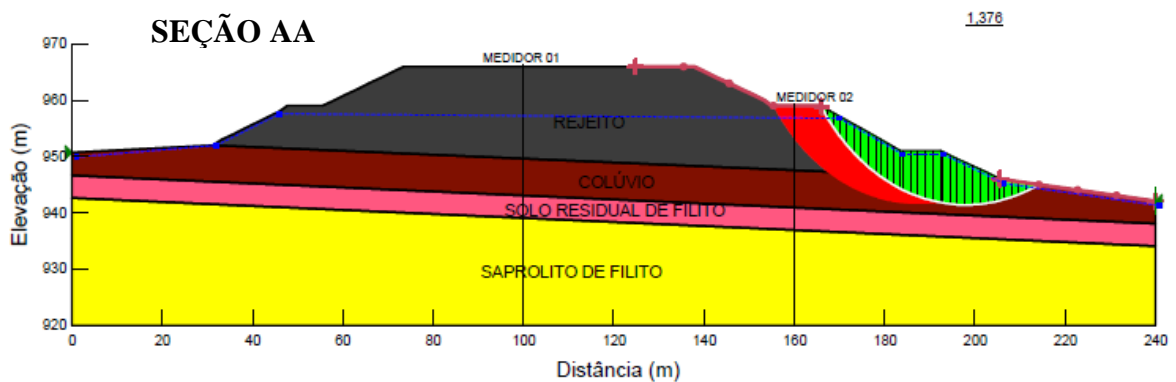
Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 23 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 2 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

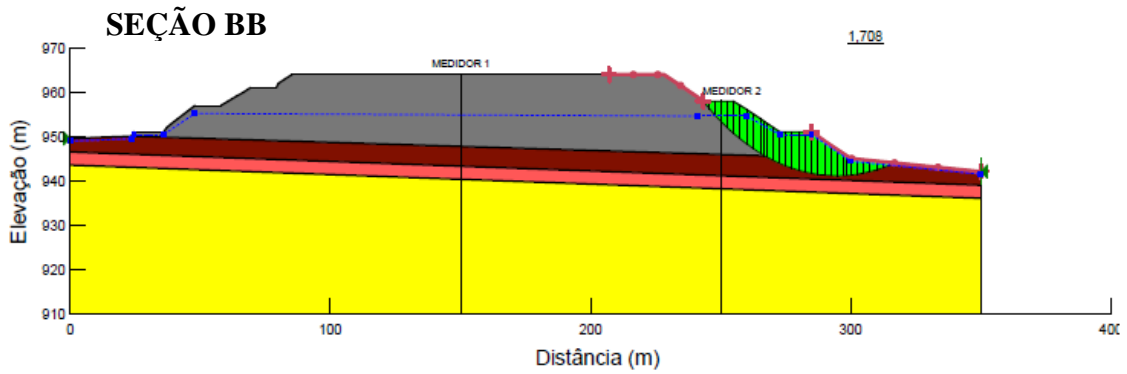
Figura 24 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 3 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

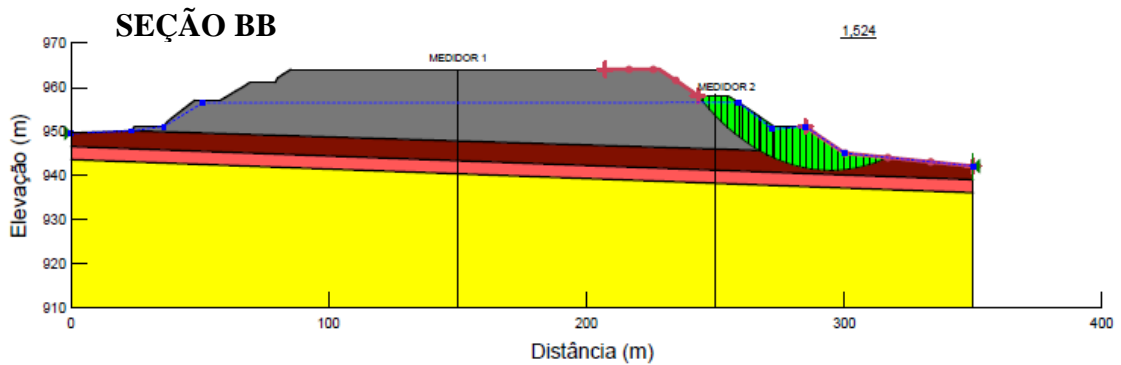
Por fim, nas figuras 25, 26 e 27 estão representadas as seções BB, com os resultados da análise determinística por Bishop. Na figura 25 está representada a posição mais baixa da linha, na 26 a posição mediana e por último, na figura 27 a mais elevada.

Figura 25 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 1 da linha freática.



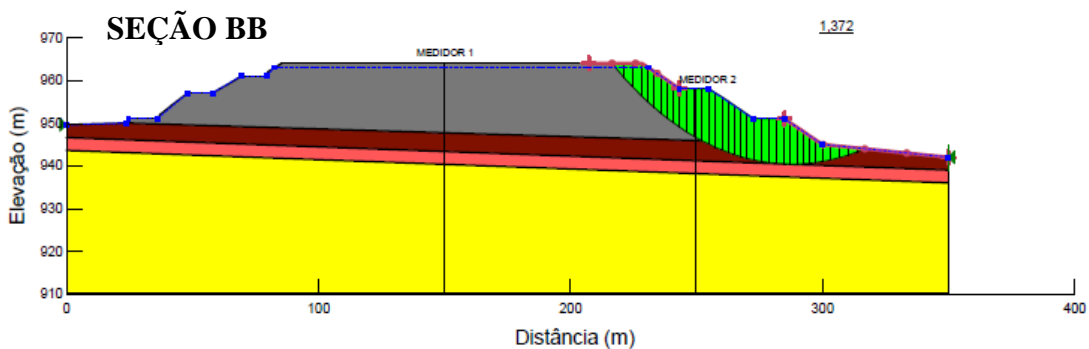
Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 26 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 2 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).

Figura 27 - Resultados análises determinísticas por Bishop – Posição 3 da linha freática.



Fonte: Dos Autores (2022).



A Tabela 5 apresenta os valores dos fatores de segurança para seções AA e BB do talude em estudo, para as posições da linha freática considerada, de acordo com métodos de análise considerados.

Tabela 5 - Resultados Determinísticos.

Linha freática	1	2	3	1	2	3
	FS seção AA	FS seção AA	FS seção AA	FS seção BB	FS seção BB	FS seção BB
Bishop	1,618	1,472	1,376	1,708	1,524	1,372
Morgenstern - Price	1,610	1,464	1,367	1,700	1,515	1,363
Spencer	1,610	1,464	1,367	1,700	1,515	1,363

Fonte: Dos Autores (2022).

Diante dos resultados é possível observar que os métodos de Morgenstern Price (1965) e de Spencer (1967) apresentam fatores de segurança de valores idênticos, isso deve-se ao fato da função  $f(x)$  que aproxima as fatias de largura infinitesimal interligadas, ser constante. Caso esta função fosse nula os resultados de fatores de segurança seriam iguais entre os métodos de Morgenstern Price (1965) e Bishop (1955).

Os resultados indicados se referem à superfície de deslizamento com o menor fator de segurança da estabilidade do talude na seção avaliada, que é a superfície crítica.

Ao comparar os resultados, observa-se que os obtidos em Bishop (1955) se diferem em relação aos outros dois métodos, isso se deve ao fato de Morgenstern Price (1965) e Spencer (1967) serem métodos rigorosos e satisfazerem as três equações de equilíbrio: equações de equilíbrio das forças horizontais e verticais e equação de equilíbrio de momentos, já Bishop (1955) baseia-se apenas na verificação da equação de equilíbrio de momentos e a equação de equilíbrio das forças verticais, desprezando as forças horizontais entre os blocos que formam a superfície de deslizamento.

Além disso, o FS em Bishop (1955) é obtido através da Equação 1 e os outros dois métodos utilizam a iteração da inclinação das forças atuantes entre blocos e do próprio fator de segurança FS para obtenção do resultado.

A Tabela 6 indica o nível d'água em dois pontos da linha piezométrica, medido a partir de dois medidores, que a cada mudança da altura da linha registravam diferentes leituras.

Tabela 6 - Leituras de nível d'água (em metros).

<b>Medidores</b>	<b>Seção AA1</b>	<b>Seção AA2</b>	<b>Seção AA3</b>	<b>Seção BB1</b>	<b>Seção BB2</b>	<b>Seção BB3</b>
Medidor 1	951	953	957	955	956	963
Medidor 2	950	952	956	954	956	958

Fonte: Dos Autores (2022).

Como esperado, o nível d'água influenciou fortemente nos resultados, mostrando que à medida que a linha piezométrica se desloca para um nível mais alto, menor o fator de segurança, indicando alerta quanto à estabilidade da pilha. Isso ocorre pelo aumento da pressão da água exercida nos vazios do solo, chamada poropressão, que de acordo com Gerscovich (2016), faz com que as tensões cisalhantes atuantes se igualem as tensões resistentes, influenciando diretamente na estabilidade do maciço. Como a pressão da água nos poros tem papel fundamental na avaliação da estabilidade de taludes, o projeto deve contemplar diferentes hipóteses de padrão de fluxo e/ou condições de drenagem, de forma a esgotar todas as possibilidades possíveis que possam ocorrer durante, após a construção e ao longo da vida útil do projeto (GERSCOVICH, 2016).

De acordo com a Tabela 1, os valores FS entre 1,3 e 1,5 são considerados críticos, e acima de 1,5 normais. Dessa forma, analisando os resultados apresentados na Tabela 5, pode-se observar que as seções AA1, BB1 e BB2 indicam que a superfície freática do empilhamento opera em condições normais, o que garante estabilidade ao maciço. Já os resultados das seções AA2, AA3, BB3 mostram que a superfície freática da pilha opera em condições críticas, o que significa um estado de alerta quanto a estabilidade da pilha.

A Tabela 7 apresenta a relação das seções com seus respectivos níveis freáticos e fatores de segurança. Os valores de fatores de segurança apresentados indicam a situação mais crítica do maciço, uma vez que foi adotado o menor resultado entre os métodos, sendo considerado o fator de segurança crítico para ser a favor da segurança.

Tabela 7 - Nível freático e fator de segurança das seções em estudo.

<b>Seção</b>	<b>Nível freático</b>	<b>Fator de segurança</b>
AA1	Normal	1,610
AA2	Crítico	1,464
AA3	Crítico	1,367
BB1	Normal	1,700
BB2	Normal	1,515
BB3	Crítico	1,363

Fonte: Dos Autores (2022).

#### 4.1 Carta de Risco

Com os resultados dos fatores de segurança apresentados e os níveis de água medidos pelos medidores, foi possível elaborar uma carta de risco para o empilhamento drenado, que pode ser monitorado por um operador se baseando no nível d'água.

A Tabela 8 abaixo representa um resumo das seções e seus respectivos níveis críticos e normais indicados pelos medidores 01 e 02 instalados na pilha. Com essa relação é possível saber qual valor de nível de água indica o estado crítico ou normal de operação da pilha.

Tabela 8 - Níveis de referência dos indicadores de nível d'água.

<b>Medidor</b>	<b>Seção</b>	<b>Nível normal (m)</b>	<b>Nível crítico (m)</b>
1	AA1	951	-
	AA2	-	953
	AA3	-	957
	BB1	955	-
	BB2	956	-
	BB3	-	963
2	AA1	950	-
	AA2	-	952
	AA3	-	956
	BB1	954	-
	BB2	956	-
	BB3	-	958

Fonte: Dos Autores (2022).

## 5 CONCLUSÃO

Na análise de estabilidade de dois taludes de um empilhamento drenado localizado na região de Congonhas/MG, foram escolhidas duas seções de maior inclinação para o estudo, consideradas seções críticas.

Por meio do software Slope/W da Geostudio, versão de teste gratuita, foram feitas análises determinísticas usando os métodos de Bishop (1955), Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967), e na sequência foi feita a comparação dos valores obtidos entre eles.

Com os resultados encontrados foi possível observar a proximidade dos valores dos FS entre dois dos métodos. Como esperado os métodos considerados rigorosos, Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967), geraram resultados idênticos devido as considerações feitas por eles. Embora os resultados apresentados pelo método de Bishop (1955) terem se diferenciado dos demais, eles se mostraram confiantes, pois houve apenas uma pequena diferença entre os valores de fatores de segurança quando comparados aos dois outros métodos.

Já era previsto também que a altura da linha piezométrica influenciasse diretamente nos resultados, e de fato isso ocorreu. À medida que se deslocou a linha para uma posição mais elevada que a anterior, menor foi o valor obtido de FS, sinalizando estado normal ou crítico quanto à operação da pilha. Dessa forma, todos os três métodos analisados sofreram influência direta do nível d'água, sendo um fator crucial no que diz respeito à garantia de segurança do maciço.

Os trabalhadores, a sociedade e o meio ambiente são as principais vítimas dos acidentes envolvendo barragens. Pensando nisso, foi criada uma carta de risco baseada nos fatores de segurança e níveis de água, para facilitar o monitoramento da estrutura e evitar um eventual desastre.

Por fim, pode-se concluir que por mais que o empilhamento drenado seja uma alternativa mais segura à disposição de rejeitos de mineração, não se pode descartar a ocorrência de eventuais problemas durante sua vida útil. Dessa forma, é muito importante que cada vez mais a cultura de monitoramento das pilhas de rejeito seja implantada nas mineradoras, a fim de garantir estabilidade dessas estruturas e a segurança daqueles que os cercam.

## REFERÊNCIAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-13029: **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **ANM publica nova norma para barragens de mineração**. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/noticias/anm-publica-nova-normapara-barragens-de-mineracao>. Acesso em: 08 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11.682** – “Estabilidade de encostas”. Rio de Janeiro. 2009.

BAECHER G.B., & CHRISTIAN, J.T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. John Wiley & Sons. 2003.

CARVALHO, L. R. **Avaliação da estabilidade de pilhas de rejeitados minérios sob diferentes condições de fluxo em modelos numéricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. 2022. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/140872/2/553613.pdf>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.

CHRISTIAN, J.T., LADD, C. C. e BAECHER, G.B. **Reliability Applied to Slope Stability Analysis**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 120 (12), pp. 2180-2207. 1992.

CRESTANI, B. **Análise probabilística do Fator de Segurança de taludes através do método de Monte Carlo**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil), UFSC, Florianópolis. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/187911>. Acesso em: 15 de mai. de 2022.

DUNCAN, J.M.; WRIGHT, S.G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 16, n. 1-2, p.5-17, jul. 1980. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0013795280900034>. Acesso em: 12 de mai. de 2022.

FELLENIUS, W. **Calculation of the Stability of Earth Dams**. Transactions 2nd Congress on Large Dams, Washington, D. C., USA, vol. 4, pp. 445-459. 1936.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de janbu e Spencer**. Dissertação parcial (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 166 p.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. 193 p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2351>. Acesso em: 14 de mai. de 2022.

GRIFFITHS, D. V. & FENTON, G. A. (2007). **Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering**. Internacional Centre For Mechanical Sciences, New York, p. 71-112.

HARR, M. E. **Reliability- Based Design in Civil Engineering**. McGraw-Hill, Inc., U.S.A. 1987.

LEE, I. K., WEEKS, W. e INGLES, O. G. **Geotechnical Engineering**. Ed. Pitman. Marshfield, E.U.A. 1983.

LUPO, J., & HALL, J. **Dry stack tailings–design considerations**. 2010. In: Proceedings Fourteenth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado, USA, AA Balkema, The Netherlands

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **MME estabelece eixos estruturantes para o setor mineral**. 2019. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-estabelece-eixos-estruturantes-para-o-setor-mineral](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-estabelece-eixos-estruturantes-para-o-setor-mineral). Acesso em: 03 mai. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **RESOLUÇÃO Nº 13, DE 8 DE AGOSTO DE 2019**. Diário Oficial da União. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 27 abr. 2021.

MOREIRA, B. O. **Viabilidade econômica de lavra de empilhamento drenado**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. 47 p. Disponível em: [https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3600/1/MONOGRAFIA\\_ViabilidadeEcon%C3%B4micaLavra.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3600/1/MONOGRAFIA_ViabilidadeEcon%C3%B4micaLavra.pdf). Acesso em: 05 de mai. de 2022.

PIMENTA JÚNIOR, I. **Caracterização geotécnica e análise de estabilidade de taludes de mineração em solos da mina de Capão Xavier**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. 2005. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3708/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2022.

RIBEIRO, S. M; ESPÓSITO, T. **Avaliação de Segurança de Barragens: Piping como Critério para Elaboração de Carta de Segurança**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. Disponível em: <https://plataforma.swge.com.br/PROCEEDINGS/PDF/GJ-11-0001.pdf>. Acesso em 08 ju. 2022.

ROBERTSON, A. MacG., STEFFEN & KIRSTEN. **Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects**. Vancouver, Canadá, Vol. 1, 24p. 1985.

SANDOVAL, M. A. P. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012. 194 p. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=21816@1>. Acesso em: 02 de mai. de 2022.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. 134 p. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6375>. Acesso em: 14 de mai. de 2022.

SILVA, D. L. **Estudo comparativo entre análises probabilísticas e determinísticas de estabilidade de talude de um depósito de resíduos de mineração**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/mopolio10027619.pdf>. Acesso em: 03 de jun. de 2022.

SILVA, J. P. M. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/62106>. Acesso em: 03 mai. 2022.

SILVA, M. J. F. **Análise de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite geral**. Dissertação parcial (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/69169/2/26087.pdf>. Acesso em: 15 de mai. de 2022.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: **Tratamento de minérios**, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: [http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CC\\_L00410010.pdf](http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CC_L00410010.pdf). Acesso em: 03 de mai. de 2022.

SOUZA, G. O. **Análise comparativa entre métodos de análise de estabilidade de taludes**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. 71 p. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40493>. Acesso em: 01 de jun. de 2022.

SOUZA, L. C. **Análise da disposição de rejeitos desaguados**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília. 2018. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20956/1/2018\\_LunaClarianaDeSouza\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20956/1/2018_LunaClarianaDeSouza_tcc.pdf). Acesso em: 04 mai. 2022.

SOUZA, W. A. R. **Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição durante a Construção**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, 2020. 71 P. Disponível em: [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/39799/1/2020\\_WeberAnselmosRamosSouza.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/39799/1/2020_WeberAnselmosRamosSouza.pdf). Acesso em: 17 de abril de 2022.

VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. 2018. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2018. 82 p. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35100/35100.PDF>. Acesso em: 25 de abril de 2022.

WICKLAND B.; LONGO S. **Mine Waste Case Examples of Stacked Tailings and CoDisposal**. Banff. 17 slides, color. 2017.