

# ESTABILIDADE DE TALUDES EM ÁREA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

**Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, Brasil

**André Luís Brasil Cavalcante**

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, Brasil

## RESUMO

A implementação de barragens está atrelada ao desenvolvimento socioeconômico de uma determinada região. Nesse contexto, a realização de análises de estabilidade de taludes emerge como fundamental, dada o risco socioeconômico e ambiental associado à potencial falha dessas estruturas, como evidenciado nos trágicos incidentes em Mariana e Brumadinho, no Brasil. A avaliação da estabilidade, ancorada nos índices de segurança, e a escolha criteriosa de métodos analíticos são elementos cruciais para garantir a robustez dessas edificações. Diante desse cenário, a presente pesquisa propõe a aplicação de métodos de análise de estabilidade de taludes, empregando o Método de Equilíbrio Limite. O objetivo é investigar e comparar os índices de segurança na zona de disposição de rejeitos provenientes da atividade mineradora. Para tanto, serão conduzidas simulações computacionais utilizando os softwares especializados SLIDE2, contemplando diferentes Métodos de Equilíbrio Limite (MEL), tais como o método de Bishop, Morgenstern-Price e Janbu. Os cenários analisados consistem em diferentes composições de materiais de taludes e fundação, analisando um caso fictício de talude homogêneo de aterro com fundação arenosa, um perfil com aterro, fundação arenosa e uma camada de fundação argilosa e, por fim, uma análise de sensibilidade considerando o aumento desta camada argilosa, a fim de testar os limites da estrutura. Através da modelagem de seções, foi possível realizar uma análise comparativa entre os fatores de segurança. As análises realizadas corroboraram as premissas teóricas, evidenciando uma certa convergência entre os métodos menos rigorosos, Bishop e Janbu, quando utilizados nas análises em duas dimensões pelo Método do Equilíbrio Limite. No entanto, houve uma disparidade em relação ao método mais rigoroso adotado, o Método de Morgenstern-Price.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de Taludes, Método de Equilíbrio Limite, Simulações Computacionais, Disposição de Rejeitos.

## ABSTRACT

*The implementation of dams is intrinsically linked to the socioeconomic development of a particular region. In this context, the analysis of slope stability emerges as fundamental, given the socioeconomic and environmental risk associated with the potential failure of these structures, as evidenced in the tragic incidents in Mariana and Brumadinho, Brazil. The evaluation of stability, anchored in safety indices, and the judicious choice of analytical methods are crucial elements to ensure the robustness of these constructions. In this scenario, the present research proposes the application of slope stability analysis methods, employing the Limit Equilibrium Method. The objective is to investigate and compare safety indices in the area of disposal of tailings from mining activities. For this purpose, computational simulations will be conducted using specialized software SLIDE2, encompassing different Limit Equilibrium Methods (LEM), such as the Bishop method, Morgenstern-Price, and Janbu. The analyzed scenarios consist of different compositions of slope and foundation materials, examining a fictitious case of homogeneous embankment slope with a sandy foundation, a profile with embankment, sandy foundation, and a layer of clayey foundation, and finally, a sensitivity analysis considering an increase in this clay layer to test the limits of the structure. Through the modeling of sections, it was possible to conduct a comparative analysis of*

\*Autor correspondente: [farukyasin22@gmail.com](mailto:farukyasin22@gmail.com)

safety factors. The analyses supported theoretical assumptions, showing a certain convergence between the less rigorous methods, Bishop and Janbu, when used in two-dimensional analyses by the Limit Equilibrium Method. However, there was a disparity concerning the more rigorous method adopted, the Morgenstern-Price Method.

**KEYWORDS:** Slope Stability, Limit Equilibrium Method, Computational Simulations, Three-Dimensional Analysis, Waste Disposal.

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens é inextricavelmente vinculada às demandas e ao progresso dos setores socioeconômicos regionais, impulsionada por atividades mineradoras, energéticas, agropecuárias e afins. Nesse cenário, a análise de estabilidade de taludes emerge como um ponto crucial no campo da geotecnia, dada a significativa ameaça socioeconômica e ambiental decorrente de possíveis falhas nessas estruturas. Este problema ganhou proeminência no Brasil após os desastres nas barragens de Fundão, em Mariana, e Córrego do Feijão, em Brumadinho, intensificando a necessidade de foco na segurança desses empreendimentos.

Essa problemática geotécnica transcende barragens e alcança encostas naturais, taludes de aterros e pilhas, onde a instabilidade ocorre quando as tensões cisalhantes superam a resistência ao cisalhamento do material, culminando na ruptura do maciço (Dias, 2021). A segurança dessas estruturas está intrinsecamente ligada ao fator de segurança previamente estabelecido, crucial para a concepção e implantação de projetos, geralmente expresso por um coeficiente mínimo de segurança (Gerscovich, 2016).

A escolha do método de análise de estabilidade por profissionais deve permitir a identificação das condições de segurança, visando propor soluções tecnicamente viáveis e economicamente sustentáveis (Oliveira et al., 1998). Tais análises podem ser conduzidas pelo método de equilíbrio limite, que é amplamente utilizado para se calcular o fator de segurança de uma estrutura.

Este estudo tem como propósito analisar uma área de disposição de rejeitos minerais utilizando métodos de análise de estabilidade de taludes pelos métodos de equilíbrio limite. Busca-se simular o comportamento dessas estruturas mediante diferentes métodos, avaliando suas respostas conforme as premissas adotadas. A pesquisa visa contribuir para a mitigação de riscos ambientais e a proteção das comunidades circunvizinhas, proporcionando uma valiosa contribuição para a gestão de resíduos na indústria de mineração.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia geral proposta para o desenvolvimento deste projeto final está apresentada na Figura 1.

Os resultados do estudo são apresentados em gráficos e tabelas que permitem comparar a porcentagem de variação, apresenta-se um fluxograma para facilitar a compreensão dessas etapas.

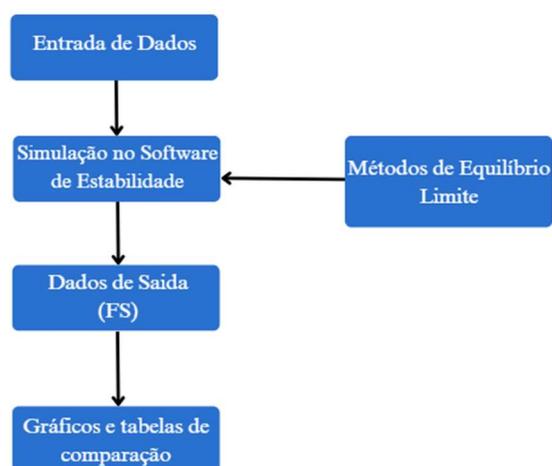


Figura 1: Metodologia de pesquisa.

### 2.1 Materiais

Os objetos de estudo deste trabalho estão relacionados a taludes em uma área de mineração fictícia, nos quais foram realizadas análises de estabilidade utilizando diferentes métodos de avaliação de segurança. Para todos os cenários de estudo, foi adotada uma geometria típica de talude com uma inclinação de 1:2, o que significa que a razão entre a altura e o comprimento da superfície de deslizamento é de 1 para 2, neste caso, a altura do talude é de 15 metros na Figura 2.

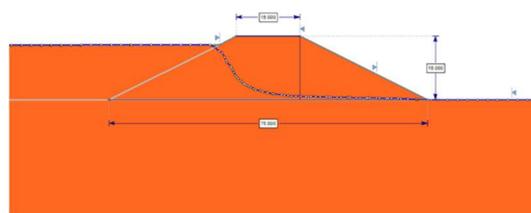


Figura 2. Estrutura Analisada.

Este estudo aborda três objetos distintos de análise de taludes. O primeiro, representado na Figura 03, concentra-se em taludes compostos exclusivamente por maciços de aterro, visando avaliar o comportamento de materiais homogêneos em relação à estabilidade. Os resultados fornecerão uma base de referência para comparações subsequentes.

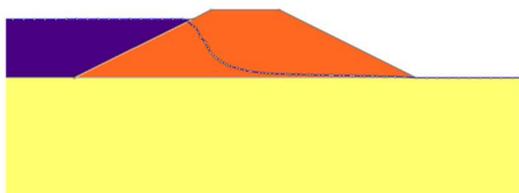


Figura 3. Cenário 01.

O segundo objeto de estudo, ilustrado na Figura 4, apresenta um talude composto por dois materiais distintos: fundação arenosa e fundação argilosa. Essa configuração tem o propósito de examinar a influência da heterogeneidade do solo na estabilidade do talude.

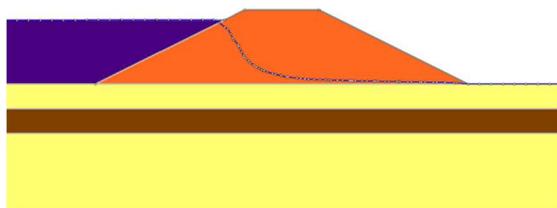


Figura 4. Cenário 02.

Por fim, o terceiro objeto de estudo, que pode ser observado na Figura 5, é composto pelos mesmos dois materiais na fundação. No entanto, a camada argilosa possui 7 metros de espessura e se encontra a 3 metros da cota de topo. Neste caso, a maior camada acrescenta um desafio adicional à análise, uma vez que essa camada menos resistente pode ter um impacto significativo na estabilidade global do talude.

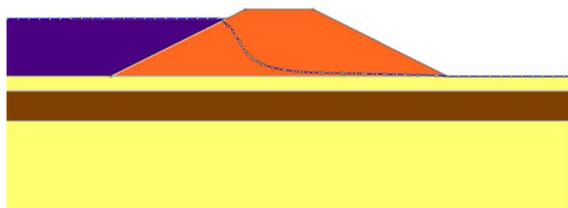


Figura 5. Cenário 03.

Os parâmetros empregados para o solo de aterro, areia, areia de baixa resistência, argila siltosa e rocha foram obtidos a partir de valores médios empregados na literatura.

Tabela 1. Parâmetros efetivos do solo utilizados

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (kPa)
Aterro Compactado	18,00	32	20
Fundação Areia	20,00	40	10
Rejeito	15,00	-	-
Fundação Argilosa	20,00	-	-

Fonte: Bowles (1997).

Para os materiais que estão abaixo da freática e não apresentam comportamento drenante, foi utilizado a opção de Razão de Resistência Não Drenada para realizar as simulações, assim, os valores médios foram extraídos da pesquisa de Pinto (2023), conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros não efetivos Pinto (2023)

Material	Razão de Resistência Não Drenada (kPa)	Resistência Não Drenada Mínima (kPa)
Rejeito	0.1	5
Fundação Argilosa	0.28	10

Fonte: Pinto (2023).

## 2.2 Método

Com base na revisão da literatura, o talude da área de estudo será simulado nos softwares de análise de estabilidade, com o objetivo de determinar o fator de segurança desses taludes e realizar uma comparação entre os métodos.

As etapas de simulação seguiram o seguinte passo a passo: preparação dos modelos, condução das simulações de estabilidade pelo MEL, análise dos resultados e comparação entre os métodos de análise.

Em cada etapa das simulações, serão feitas capturas de tela para documentar o processo e os resultados. As imagens serão incluídas no corpo do texto para ilustrar a metodologia utilizada e os resultados obtidos. Além disso, todas as suposições e escolhas feitas durante as simulações serão claramente documentadas e justificadas para fornecer um registro completo e transparente do processo.

Por fim, a legenda dos materiais pode ser encontrado na Figura 6.

Material Name	Color
Aterro Compactado	
Rejeito	
Fundação Arenosa	
Fundação Argilosa	

Figura 6. Estrutura Analisada.

### 2.3 Generalidades dos taludes

Talude é um termo genérico, que compreende qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou ambos. Pode ser natural, como encostas ou vertentes, ou artificiais, quando construídos pelo homem, caso dos taludes de mineração (Fiori, 2001). A Figura 7 apresenta a terminologia da palavra.

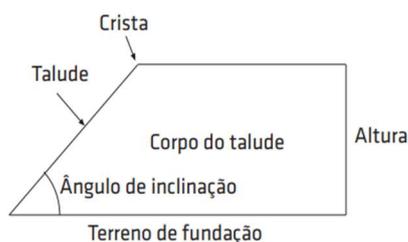


Figura 7. Terminologia de Taludes.  
Fonte: Fiori (2001).

Conforme estabelecido pela norma NBR 11682 (ABNT, 2009), taludes são categorizados como naturais, originados unicamente por processos naturais, ou artificiais, resultantes de intervenções humanas como aterros e cortes durante atividades de movimentação de terra. Encostas naturais, suscetíveis à instabilidade, estão sujeitas a forças externas e exibem grande heterogeneidade, originando-se de solos residuais ou coluviais (Gerscovich, 2016). Por outro lado, taludes artificiais, construídos pelo homem, apresentam maior homogeneidade, permitindo inclinações mais acentuadas.

A instabilidade de taludes pode ser ocasionada por diversas razões, classificadas como naturais, antropogênicas ou uma combinação de ambas. Causas naturais incluem atividades sísmicas, vulcânicas e saturação decorrente de chuvas intensas. Já as causas antropogênicas envolvem

carregamentos devido à ocupação inadequada e expansão urbana descontrolada, além de alterações hidrológicas como drenagem e irrigação (Highland e Bobrowsky, 2008). A combinação desses fatores pode resultar em rupturas significativas, destacando a importância da análise e prevenção em taludes.

O estudo da estabilidade de taludes é crucial para garantir a segurança das áreas afetadas, especialmente diante da frequência global de acidentes que resultam em perdas humanas e danos substanciais. Fatores como a natureza dos materiais e influências externas, sejam elas geológicas, antropogênicas ou geotécnicas, desempenham papel fundamental na estabilidade dos taludes. Essa complexidade ressalta a importância da análise de taludes para especialistas em Geologia Aplicada, Mecânica dos Solos e Mecânica das Rochas (Fiori, 2015).

### 2.4 Movimentos de terra e agentes instabilizadores

A instabilidade de um talude se manifesta quando uma porção de sua massa se desloca, perdendo o equilíbrio e desencadeando um movimento. Segundo Augusto Filho e Virgili (1998), a instabilidade de taludes e encostas segue uma cadeia de eventos, frequentemente cíclicos, que remontam à formação da rocha, sua história geológica e geomorfológica. Esse fenômeno ocorre quando as forças de tração, originadas da gravidade atuando na inclinação do terreno, superam as forças de resistência, destacando-se especialmente as forças de atrito (Montgomery, 1992).

Diversas definições e classificações abordam o movimento de taludes e os agentes que influenciam em sua estabilidade. Entre elas, as principais incluem: quedas, tombamentos, escorregamentos e escoamentos.

### 2.5 Teoria do Equilíbrio Limite

A Teoria de Equilíbrio Limite fundamenta os métodos de equilíbrio conhecidos, sendo essencial na análise do equilíbrio de massas de solo sujeitas a rupturas. Este estudo aborda o método que trata a massa de solo acima da superfície de deslizamento como um corpo livre, assumindo universalmente um fator de segurança de 1 ao longo da linha de ruptura, embora esta premissa não seja totalmente precisa (Silva, 2011).

Partindo da hipótese do critério de Mohr-Coulomb, o método desconsidera deformações no material,

atingindo equilíbrio pela igualdade de forças e momentos (Ventura, 2009). Características notáveis incluem a suposição de uma superfície de ruptura bem definida e a utilização constante de um único coeficiente de segurança ao longo desta superfície. O método, de maneira genérica, pressupõe o comportamento dos maciços como materiais rígidos-perfeitamente plásticos, negligenciando campos de tensão e deformação resultantes de carregamentos externos. Este artigo proporciona uma análise crítica dessa teoria, visando contribuir para o refinamento das abordagens geotécnicas contemporâneas.

Dessa forma, o fator de segurança pode ser estimado de duas formas, são elas:

Equilíbrio de forças:

$$FS = \frac{F_{estabilizadoras}}{F_{desestabilizadoras}} \quad (1)$$

Equilíbrio de momentos:

$$FS = \frac{M_{estabilizadoras}}{M_{desestabilizadoras}} \quad (2)$$

O método das fatias, adotado neste estudo, apresenta uma abordagem eficiente para a análise de taludes. Ao arbitrar uma superfície de deslizamento, seja plana, circular ou mista, a base de cada fatia é simplificada representada por um segmento de reta. Esta simplificação visa facilitar o cálculo do peso próprio do solo. A redução na largura de cada fatia contribui para uma análise mais precisa, exigindo um maior número de fatias para alcançar o fator de segurança desejado (Silva, 2011).

A Figura 8 ilustra um exemplo prático da divisão de taludes em fatias, destacando a aplicação visual deste método.

Silva (2011) destaca que a obtenção do Fator de Segurança (FS) em análises de estabilidade de taludes pode ser realizada de diversas maneiras, sendo a abordagem pela equação de momentos a mais prevalente nos métodos de equilíbrio limite. Ao analisar o número de incógnitas em relação às equações disponíveis, identifica-se um problema estaticamente indeterminado, expresso por  $(6n-2)$  incógnitas para  $(4n)$  equações, onde "n" é o número de fatias considerado.

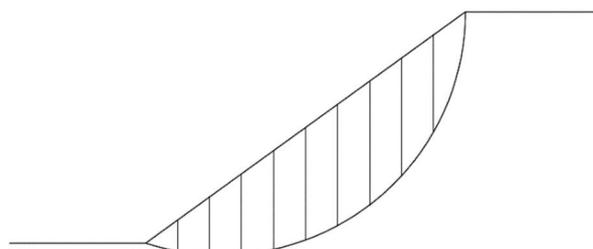


Figura 8. Talude com diferentes fatias.  
Fonte: Silva (2011).

Para superar essa indeterminação, são introduzidas simplificações que garantem o equilíbrio entre as equações, transformando o sistema em um conjunto determinado. Essas simplificações, apesar de implicarem limitações na precisão, são essenciais para viabilizar a aplicação do método e fornecer uma solução coerente para a análise de estabilidade de taludes. Este trabalho busca contribuir para o entendimento e aprimoramento dessas abordagens, visando uma aplicação mais precisa e eficaz na prática geotécnica.

## 2.6 Método de Janbu

O método desenvolvido por Janbu (1973) é apto para aplicação em cenários nos quais as superfícies de escorregamento não exibem necessariamente uma conformação circular. O Fator de Segurança (FS), obtido por meio do método de Janbu, guarda semelhança com o calculado pelo método de Bishop, sendo multiplicado por um fator  $f_0$ . A magnitude de  $f_0$  é influenciada pela geometria específica da superfície de escorregamento sob análise, conjuntamente com os parâmetros  $c$  e  $\phi$ , considerando a interação das forças verticais entre as lamelas. Em geral, os valores típicos para  $f_0$  variam entre 1,0 e 1,3 (Fiori, 2015).

O método simplificado de Janbu desconsidera as forças normais e de cisalhamento entre as fatias, focalizando exclusivamente no equilíbrio das forças. Para contornar essa simplificação, o método introduz um fator de correção  $f_0$ , multiplicado pelo fator de segurança resultante do equilíbrio de forças na direção horizontal. Esse fator de correção compensa as forças de interação desconsideradas pelo método, resultando no fator de segurança final, obtido pela multiplicação do FS e  $f_0$ . A equação de equilíbrio das forças verticais possibilita calcular a força normal na base (FREDLUND, 1977).

Conforme Gerscovich (2016), o método simplificado de Janbu foi desenvolvido com o propósito de reduzir a carga computacional exigida

pelos métodos rigorosos, viabilizando a obtenção do Fator de Segurança por meio de cálculos mais simplificados. Embora seja aplicável a análises de taludes homogêneos, o método pode não produzir resultados satisfatórios para superfícies de ruptura com formato de cunha. Os efeitos das forças cisalhantes interlamelares são incorporados ao cálculo por meio de um fator de correção ( $f_0$ ), determinado através da comparação entre os fatores de segurança obtidos pelos métodos simplificado e generalizado exemplificado pela Figura 9.

Por fim, o fator de segurança pode ser encontrado pela seguinte expressão:

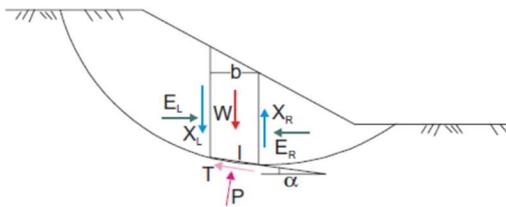


Figura 9. Geometria do método de Janbu simplificado.  
 Fonte: Modificado de Lima (2002)

Dessa forma, a equação para cálculo do fator de segurança pode ser expressa da seguinte forma

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot l + (P - u \cdot l) \cdot \text{tg } \phi'] \cdot \sec \alpha}{\sum W \cdot \text{tg } \alpha} \quad (4)$$

### 2.7 Método de Bishop Simplificado

O método de Bishop, inicialmente desenvolvido para análise de superfícies circulares, demonstra aplicabilidade também em superfícies não circulares, conforme Albataineh (2006). O método opera sob certas premissas, incluindo a concepção de que a falha ocorre por meio da rotação de uma massa de solo em uma superfície de deslizamento circular centrada em um ponto comum. Adicionalmente, assume-se que as forças laterais nas fatias são horizontais, eliminando tensões de cisalhamento entre estas fatias (Bishop, 1955). A força normal total é tratada como atuando no centro da base de cada fatia, sendo obtida pela soma das forças na direção vertical. Estas premissas fundamentais são essenciais para o adequado entendimento e aplicação do método de Bishop em análises de estabilidade geotécnica. A Figura 10 exemplifica o método em um talude.

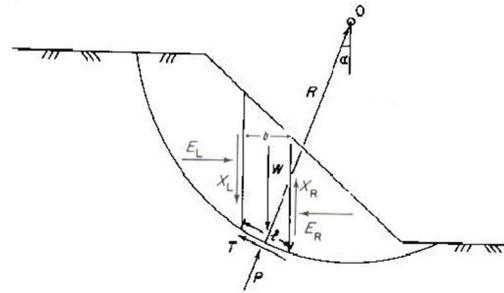


Figura 10: Método de Bishop – Forças aplicadas a uma fatia de solo.

Fonte: Anderson e Richards (1987)

Dessa forma, a equação para cálculo do fator de segurança pode ser expressa da seguinte forma:

$$F = \frac{\sum \left[ \frac{c' \cdot l \cos \alpha + (W - ul \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi') / F} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (5)$$

### 2.8 Método de Morgenstern-Price

Segundo Gerscovich (2016), o método de Morgenstern e Price (1965) destaca-se como o mais abrangente entre os métodos de equilíbrio limite, sendo aplicável a qualquer tipo de superfície. Notavelmente, este método considera os esforços em fatias infinitesimais. Os autores enfatizam a necessidade de uma solução iterativa, na qual a função de distribuição de forças entre as fatias é predefinida. O método demanda a definição prévia de valores para o fator de segurança, a partir dos quais são calculados os empuxos  $E(x)$  e momentos  $M(x)$  para cada fatia. Essa abordagem iterativa visa proporcionar uma solução mais precisa para a estabilidade do talude. Diferentemente de outros métodos que estabelecem relações constantes entre forças interlamelares, o método de Morgenstern e Price, conforme Gerscovich (2016), permite que a inclinação da resultante ( $\theta$ ) varie ao longo da superfície de ruptura. A Figura 11 exemplifica uma fatia pelo método.

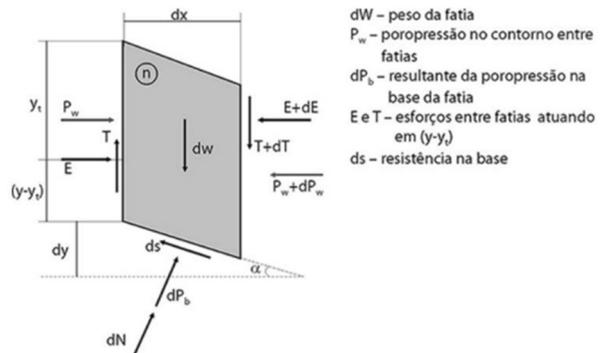


Figura 11: Seção por Morgenstern-Price.  
 Fonte: Gerscovish (2016)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

É apresentado a seguir, os resultados das análises de estabilidade pelo Método de Equilíbrio Limite a partir dos métodos mencionados anteriormente.

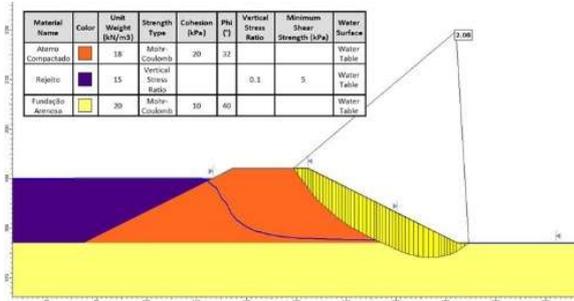


Figura 12. Método de Janbu – Primeiro caso.

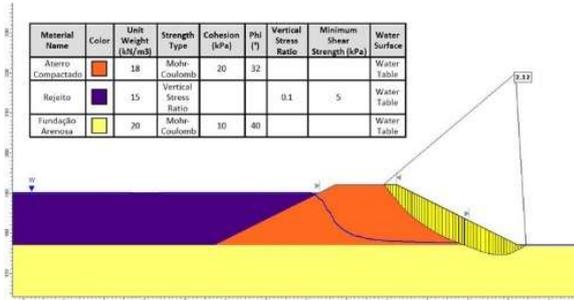


Figura 13. Método de Bishop – Primeiro caso.

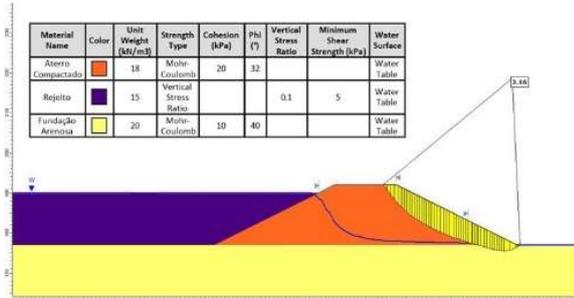


Figura 14. Método de Morgenstern-Price – Primeiro caso.

A Tabela 3 mostra o fator de segurança para cada caso realizado, bem como o método referente ao FS.

Método	Fator de Segurança
Bishop	2,12
Janbu	2,00
Morgenstern-Price	2,16

A seguir, as Figura 15, Figura 16 e Figura 17 representam as cunhas de ruptura para o segundo cenário.

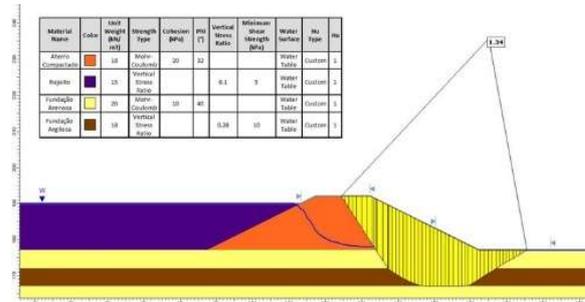


Figura 15. Método de Janbu – Segundo caso.

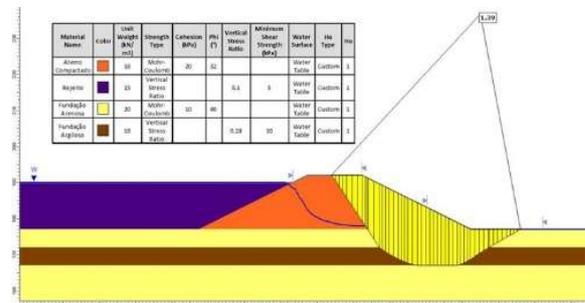


Figura 16. Método de Bishop – Segundo caso.

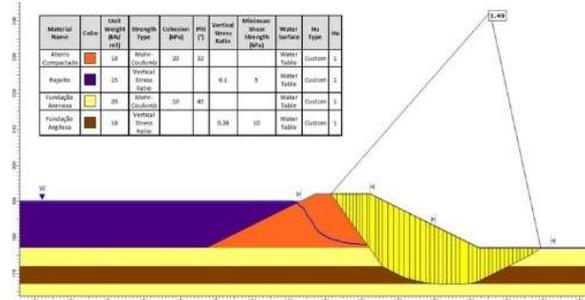


Figura 17. Método de Morgenstern-Price – Segundo caso.

A Tabela 4 mostra o fator de segurança para cada caso realizado, bem como o método referente ao FS.

Método	Fator de Segurança
Bishop	1,39
Janbu	1,34
Morgenstern-Price	1,49

A seguir, as Figura 18, Figura 19 e Figura 20 representam as cunhas de ruptura para o terceiro cenário.

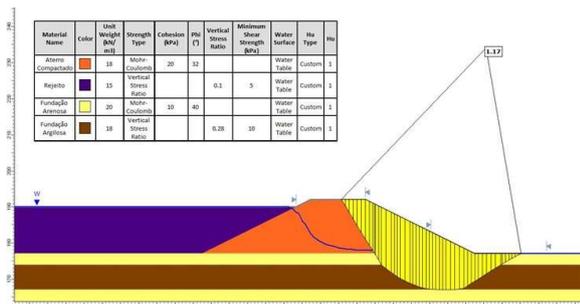


Figura 18. Método de Janbu – Terceiro Cenário.

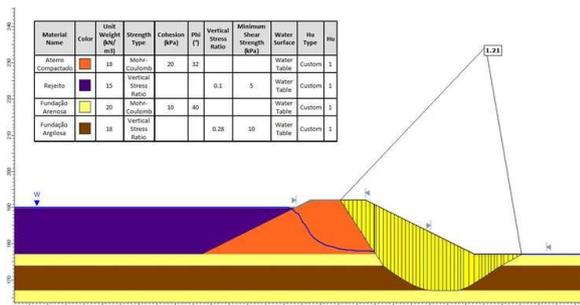


Figura 19. Método de Bishop – Terceiro Cenário.

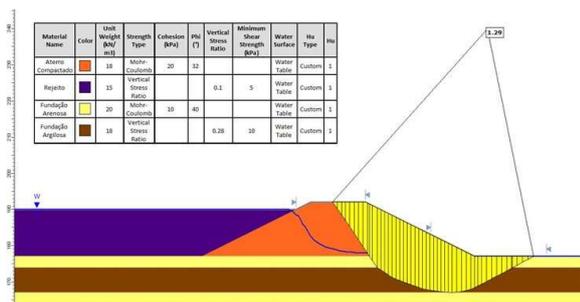


Figura 20. Método de Morgenstern-Price – Terceiro Cenário.

A Tabela 5 mostra o fator de segurança para cada caso realizado, bem como o método referente ao FS.

Método	Fator de Segurança
Bishop	1,21
Janbu	1,17
Morgenstern-Price	1,29

A literatura geotécnica respalda a abordagem adotada, evidenciando que os métodos de Bishop e Janbu, ao enfocarem predominantemente a componente horizontal resultante das forças entre as fatias, geram fatores de segurança mais conservadores em comparação com o método de Morgenstern-Price (MP), notório por sua robustez. As simplificações intrínsecas ao método de Janbu contribuem para um certo grau de conservadorismo nos resultados. Tanto o método de Bishop quanto o

de Janbu não atendem completamente às premissas de equilíbrio estático global ou individual para as fatias, refletindo-se em valores menores de fator de segurança (FS) nas duas seções analisadas. Em contraste, o método de Morgenstern-Price atende a todas as condições de equilíbrio no Método dos Elementos Limites (MEL).

A escolha dos métodos dentro dos MEL disponíveis no software foi guiada pela notoriedade na literatura. O método de Morgenstern-Price (MP) foi selecionado como referência e parâmetro para os demais devido à sua reputação de rigor e ampla adoção na prática da engenharia geotécnica. Embora os métodos de Janbu e Bishop tenham sido escolhidos devido ao desempenho satisfatório, é relevante salientar que, em comparação com o método de MP, são considerados menos rigorosos.

Na análise comparativa entre os métodos simplificados de Bishop e Janbu e os mais conservadores, destaca-se uma diferenciação mais acentuada nos cenários 2 e 3, nos quais uma camada de baixa resistência estava presente na fundação. Nessas circunstâncias específicas, a disparidade entre os fatores de segurança obtidos pelos diferentes métodos foi mais significativa. Por outro lado, no cenário 1, observou-se uma homogeneidade notável nos fatores de segurança, não evidenciando distinção substancial entre os resultados derivados de abordagens mais simplificadas em relação às mais conservadoras.

Além disso, é importante destacar que a superfície de ruptura identificada pode variar entre diferentes métodos de análise e cenários específicos. Essa variação pode ocorrer devido às diferentes premissas e algoritmos utilizados por cada método, bem como às variações nas condições de contorno e nos parâmetros de entrada. Portanto, ao comparar os resultados de diferentes métodos ou cenários, é essencial considerar a influência dessa variação na interpretação dos resultados e nas conclusões tiradas da análise de estabilidade do talude.

É perceptível, nas análises dos três casos, que o maior fator de segurança é obtido pelo método de Morgenstern-Price, alinhando-se com a robustez superior desse método em comparação aos outros dois.

A norma NBR 13.028 (2017) estabelece que os fatores de segurança para a seção considerada crítica, durante a análise de ruptura do talude geral com superfície freática normal, devem ser no mínimo de 1,50. Assim, todas as simulações cumpriam com o critério estabelecido pelo cenário 1. Entretanto, nos cenários 2 e 3, seria imprescindível efetuar ajustes na

configuração do talude para assegurar a conformidade com os requisitos normativos.

#### 4. CONCLUSÃO

A estabilidade de taludes é uma preocupação fundamental na engenharia geotécnica, dada a sua complexidade e as variáveis envolvidas. Este trabalho realizou análises por diferentes métodos do Método dos Elementos Finitos (MEL) para avaliar os resultados dos fatores de segurança obtidos em diversas abordagens e cenários.

Os fatores de segurança derivados das análises em duas dimensões utilizando o Método do Equilíbrio Limite revelaram uma certa convergência entre os métodos menos rigorosos, Bishop e Janbu, enquanto exibiram uma disparidade em relação ao método mais rigoroso adotado, o Método de Morgenstern-Price. Os valores de fator de segurança obtidos para os dois primeiros métodos foram inferiores aos do último, e essa discrepância pode ser justificada pelo fato de que esses métodos não abrangem de forma abrangente todas as premissas do MEL, como o requisito de somatório de forças e momentos nulo.

O MEL é uma abordagem amplamente utilizada devido à sua simplicidade e eficiência computacional, mas possui algumas limitações que podem afetar a precisão dos resultados. Essas limitações incluem simplificações no modelo de comportamento do solo, como a consideração de solos como materiais rígidos-plásticos, e a restrição na modelagem de condições de contorno complexas. Além disso, o MEL não leva em conta a deformação do solo e pode ser sensível aos parâmetros de entrada escolhidos. Reconhecer essas limitações é crucial para garantir uma avaliação precisa da estabilidade do talude e pode requerer o uso de abordagens complementares para complementar a análise.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão do modelo adicionando mais parâmetros e buscando uma maior proximidade com situações reais. Além disso, seria valioso realizar outras análises, como aquelas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF) e análises tridimensionais das seções. Isso contribuiria para uma compreensão mais abrangente e refinada da estabilidade de taludes em diferentes contextos.

#### AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8), pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44). Agradecemos também à Rocscience pela licença do software.

#### REFERÊNCIAS

- Albataineh, N. (2006). SLOPE STABILITY ANALYSIS USING 2D AND 3D METHODS [Master's thesis, University of Akron]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center.
- Anderson, M.G., & Richards, K.S. (1987). Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 13029: Mineração Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 13029: Mineração Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro.
- Bishop, A. W. (1955). The use of slip circles in stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. 5th ed. Singapura: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Dias, Felipe Barros. (2021). Avaliação de estabilidade de barragem alteada pelo método de montante por diferentes metodologias de cálculo de fator de segurança: comparação determinística. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Fiori, A.P., & Carmignani. (2001). *Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas aplicações na estabilidade de Taludes*. ED. UFPR.
- Fredlund, D. G., & Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 14, 429-439.
- Gerscovich, Denise M. S.. (2016). *Estabilidade de taludes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations. *Embankment-Dam Engineering - Casagrande Volume*, R.C. Hirschfeld & S.J. Poulos (eds.), John Wiley, New York, USA.
- Morgenstern, N.R., & Price, V.E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79-93.
- Montgomery, C.W. (1992). *Environmental geology*. 3ª ed. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers.
- Oliveira, Antônio Manoel dos Santos; Brito, Sérgio Nertan Alves de. (1998). *Geologia de engenharia*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.
- Pinto, Guilherme Henrique da Silva. (2023). Proposta de modelos de previsão da resistência não drenada de rejeitos de bauxita. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Silva, João Paulo. (2011). *Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na análise de estabilidade de taludes*. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia

Civil, FEUP.

Ventura, L. C. (2009). Análise da influência de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto de minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, UFOP.