

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo Comparativo da Avaliação de Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes em Barragens de Terra

Mariele Rodrigues de Oliveira

Discente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, marielerodrigues@discente.ufg.br

Lana Kainy Torres Souza

Discente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, lana-torres@hotmail.com

Laís Roberta Galdino de Oliveira

Docente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laisroberta@ufg.br

RESUMO: As barragens de terra são construções robustas, dessa forma, é necessário estudar a propensão dessa obra à ruptura. Então, conhecendo-se o fator de segurança do talude da barragem é possível prever o local de rompimento. O método de equilíbrio limite é o mais conhecido, a partir dele foram desenvolvidos outros métodos como método de Fellenius, Jambu, Morgenstern-Price, etc. Os métodos embora populares necessitem de avaliações quanto às equações governantes, os fatores de segurança e as limitantes. O trabalho objetiva realizar um estudo comparativo entre diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra, destacando-se o método de Fellenius, Jambu, Morgenstern-Price e Spencer, levando em conta principalmente os fatores de segurança. Nesse sentido, realizou-se uma revisão bibliográfica em plataformas como Google Acadêmico, CAPES e SciELO, com busca por palavras chaves. O autor I considera os coeficientes de segurança dos métodos rigorosos de Spencer e Morgenstern-Price superiores aos não rigorosos; o autor II constatou que os métodos anteriores apresentaram valores próximos. O autor III constatou que o menor Fator de Segurança foi obtido pelo método de Janbu ou de Fellenius. O autor IV ressaltou que os métodos rigorosos foram superiores ao método de Jambu e Fellenius. Conclui-se que o método escolhido influencia no resultado do Fator de Segurança. Portanto, a distinção entre os métodos analisados é referente à superfície de ruptura e aos parâmetros utilizados para realizar o cálculo das forças envolvidas na estabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Talude, Métodos de estabilidade, Barragem de terra, Fator de segurança.

ABSTRACT: Earth dams are robust constructions, therefore, it is necessary to study the propensity of this work to rupture. So, knowing the safety factor of the dam slope, it is possible to predict the breach site. The limit equilibrium method is the best known, from which other methods such as Fellenius, Jambu, Morgenstern-Price, etc. were developed. The methods, although popular, need to be evaluated regarding the governing equations, the safety factors and the limiting ones. The work aims to carry out a comparative study between different methods of analysis of slope stability in earth dams, highlighting the method of Fellenius, Jambu, Morgenstern-Price and Spencer, taking into account mainly the safety factors. In this sense, a bibliographic review was carried out on platforms such as Google Academic, CAPES and SciELO, with a search for keywords. Author I considers the safety coefficients of the strict Spencer and Morgenstern-Price methods superior to the non-strict ones; author II found that the previous methods had similar values. Author III found that the lowest Safety Factor was obtained by the Janbu or Fellenius method. Author IV pointed out that the rigorous methods were superior to the method of Jambu and Fellenius. It is concluded that the chosen method influences the result of the Safety Factor. Therefore, the distinction between the analyzed methods refers to the rupture surface and the parameters used to calculate the forces involved in stability.

KEYWORDS: Slope, Stability methods, Earth dam, Safety factor.

1 Introdução



Barragem é caracterizada por uma estrutura robusta, construída com função de armazenar água de forma a interromper o fluxo rio abaixo, outrora, essa interrupção realiza o controle do fluxo, que em geral, essa obra é construída com intuito de gerar energia, controlar enchentes, fins recreativos, dentre outros (LIMA *et al.*, 2021).

Logo, o uso de tais estruturas é datado desde tempos remotos e essas obras ocasionam muitos benefícios econômicos, bem como sociais (ROSSI *et al.*, 2021). Ainda que existam grandes avanços e estudos quanto ao projeto, construção e operação de forma segura, a ocorrência de falhas dessas estruturas não pode ser descartada (ROSSI *et al.*, 2021). O rompimento de uma estrutura desse porte acarreta danos muitas vezes irreversíveis, pois o alto potencial destrutivo corrobora danos ambientais, econômicos, perdas de vidas e é capaz de atingir populações e estruturas ao longo de seu curso de destruição (LIMA *et al.*, 2020; ROSSI *et al.*, 2021).

Historicamente, há exemplos de rompimentos de barragens ao redor do mundo, como: barragem de Saint Francis, 1928, Estados Unidos; barragem Malpasset, 1959, na França e barragem de Vajont, 1963, na Itália, mas enfatiza-se a ruptura da barragem de Teton, 1976, nos Estados Unidos; episódio no qual começou-se a estudar energeticamente o potencial de destrutibilidade desse tipo de construção (ROSSI *et al.*, 2021).

No Brasil houve barragens de rejeitos que se romperam, como: barragem do Fundão em Mariana, 2015, Barragem 1 em Brumadinho, 2019, as quais ganharam destaque na mídia proporcional ao tamanho do desastre; como também falhas em barragens de menor porte como: barragem de Herculano Mineração em Itabirito, 2014, barragem em Mirai, 2007, barragem em Curais, 2020 (LIMA *et al.*, 2020; ROSSI *et al.*, 2021). Conforme os autores supracitados, a sequência de acidentes impulsionou os órgãos responsáveis a iniciarem estudos e criar normatizações mais rigorosas visando maior segurança quanto a barragens.

Consoante Santos Júnior (2019) e Haramboure; Berenguer; Tristá, (2021) um dos vários motivos que culminam no colapso de barragens é o deslizamento de taludes; seja uma ruptura repentina ou progressiva. Viternino Neto; Freitas (2020) comentam que durante o estudo para o projeto da barragem, um item que é ressaltado é sobre a estabilidade de talude, assim como o fator de segurança relacionado ao mesmo.

O fator de segurança está relacionado à capacidade de resistência ao cisalhamento do solo, sem que ocorram deslizamentos de massa ou ruptura (DUCAN, 1996). Das (2007) ressalva que onde há o menor fator de segurança corresponde ao provável local de colapso.

Das (2007) menciona que existem taludes naturais e artificiais e define talude como uma superfície do solo relacionada com um ângulo da superfície horizontal, sujeita a deslizamento de massa. Cada superfície apresenta características geológicas, ambientais e com sua função específica, assim a fim de avaliar sua estabilidade existem diversos métodos, mas o principal descrito em várias literaturas engloba a teoria de equilíbrio limite (FERREIRA, 2012; ANTUNES *et al.*, 2018). Ainda, de acordo com ambos os autores essa teoria é fundamentada na estimação do equilíbrio de uma massa de solo relacionando-se as forças resistentes e as forças atuantes.

Ducan (1996) afirma que foram desenvolvidos vários métodos de se analisar a estabilidade de um talude, mas o método do equilíbrio limite é o mais comum quando se trata de problemas práticos. Dentro do método do equilíbrio limite existem outros métodos de equilíbrio desenvolvidos como Fellenius, Bishop simplificado, Janbu simplificado, Correia, Spencer, Morgenstern-Price, Bishop, Janbu rigoroso, sendo os quatro últimos os mais comumente utilizados (BARBOSA, 2019). Deve-se ressaltar que os métodos são divididos em rigorosos ou não rigorosos conforme números de equações da estática que são consideradas no cálculo, sendo os rigorosos os que satisfazem as três equações de equilíbrio e os não rigorosos aqueles não satisfazem todas essas equações (DUCAN, 1996; FERREIRA, 2012; ANTUNES *et al.*, 2018; BARBOSA, 2019).

Dessa forma, devido à existência de tantas possibilidades de métodos de análise é necessário avaliar-se qual o método melhor e mais condizente com a realidade a qual o mesmo será aplicado, para análise de estabilidade de talude deve-se conhecer qual a acurácia, qual a facilidade de o método ser empregado (DUCAN, 1996). Apesar dos métodos citados serem populares, inclusive nas literaturas de suporte ao trabalho, surge à necessidade de se avaliar as características, a precisão, os limitantes, as equações governantes, assim como os fatores de segurança, as limitantes, devido ao fato de que sempre existem inúmeras incertezas.



Assim, o cerne deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre os diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra, destacando-se o método de Fellenius, Jambu, Morgenstern-Price e Spencer, avaliando-se suas aplicabilidades, vantagens e desvantagens, e levando em conta os fatores de segurança.

2 Metodologia

Para atender os objetivos propostos nesta pesquisa, bem como para a seleção de estudos, buscou-se trabalhos relacionados a barragens levando em consideração taludes. A seleção foi feita através de leituras de artigos científicos, periódicos e dissertações que indicassem os tópicos citados, optando-se por trabalhos publicados nos últimos 5 anos.

Considerando questões como: “Métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens?”, buscou selecionar uma intersecção de materiais bibliográficos (dentro do contexto explorado). Após, feita a seleção dos estudos, verificou-se os resultados obtidos por cada um de forma individual, cruzando resultados dos métodos de estabilidade de taludes em barragens. Portanto, foi possível verificar a dispersão dos valores para chegar a um parecer.

Dessa maneira, para a escolha dos trabalhos foi necessário recorrer as seguintes plataformas de busca: Google Acadêmico, CAPES e SciELO. As palavras utilizadas para a coleta foram: “Taludes”, “Barragem”, “Métodos” e “Estabilidade”.

Inicialmente, foi realizada uma seleção prévia através da leitura dos resumos dos estudos. Logo, foi realizada a coleta de tópicos relevantes dos autores escolhidos, como: métodos e resultados. Assim, foi os trabalhos foram correlacionados e foram identificados pontos comuns. Os autores escolhidos estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Autores selecionados e métodos de estabilidade de taludes de barragem.

Fonte: Autoras, 2021.

Autor	Método de estabilidade adotado			
	Não rigorosos		Rigorosos	
	Fellenius	Jambu	Morgenstern-Price	Spencer
Autor I - Antunes <i>et al.</i> (2018)	X	X	X	X
Autor II - Barbosa (2019)			X	X
Autor III - Soares e Araújo (2018)	X	X		X
Autor IV - Viterbino Neto e Freitas (2020)	X	X	X	X

A comparação dos resultados foi realizada a partir da confecção de um gráfico com todos os métodos de todos os autores. Então, foi possível analisar os coeficientes de segurança obtidos com métodos rigorosos e não rigorosos.

3 Resultados

3.1 Autor I

Antunes *et al.* (2018) expõem que a distinção entre os métodos de estabilidade de taludes está relacionada a quais equações estáticas são ponderadas e satisfeitas, quais forças entre as fatias, são incorporadas e qual é a relação entre as forças cisalhante e normal entre as fatias. A Figura 1 indica um esquema de um talude dividido em fatias.

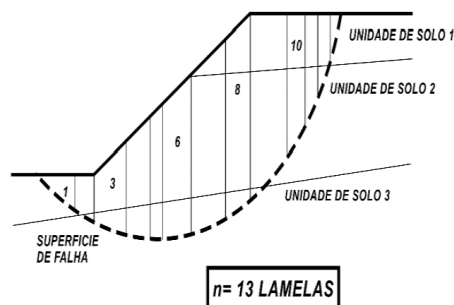


Figura 1. Divisão de um talude. Fonte: Adaptado de Abramson (2002).

Nesse sentido, esses métodos apesar de altamente difundidos e apresentarem grande utilização, possuem limitações, quanto à sua capacidade de considerar as variabilidades dos parâmetros de resistência dos materiais componentes envolvidos nas análises.

Como exposto por Antunes *et al.* (2018) os coeficientes de segurança dos métodos rigorosos de Spencer e Mogenstern-Price se mostraram consideravelmente superiores aos não rigorosos.

3.2 Autor II

Barbosa (2019) apresenta que para determinar qual a inclinação máxima que se pode adotar garantindo a segurança da barragem é necessária a adoção de um modelo que tente apresentar ou prever o comportamento dessas estruturas na realidade.

Para Barbosa (2019) os métodos Mogenstern-Price e Spencer apresentaram valores bem próximos o que pode ser devido aos métodos considerarem características similares para realizarem suas análises, porém ambos os métodos têm suas limitações e vantagens.

3.3 Autor III

Importante ressaltar que quanto maior os fatores considerados, maior é a representatividade do modelo de análise, havendo mais confiabilidade nos resultados, visto que existem várias forças atuantes em uma fatia de solo, conforme visto na Figura 2.

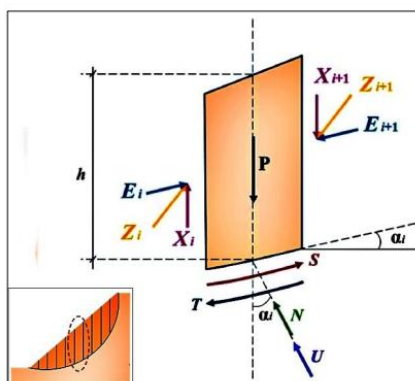


Figura 2. Forças atuantes em uma fatia de solo. Fonte: Adaptado de Soares, 2017.

Santos Junior (2019) constatou para as análises realizadas, os menores valores de Fator de Segurança (FS) foram obtidos pelo método de Janbu ou de Fellenius, indicando maior probabilidade de falha. Os dois métodos apresentaram valores bem próximos nas análises, o que pode ser pelo fato dos dois métodos serem mais conservadores. O método de Spencer foi o que apresentou maior valor de Fator de Segurança



3.4 Autor IV

Viterbino Neto e Freitas (2020) destacam a importância do estudo da segurança de um talude de barragens de terra, e da utilização de softwares na realização das análises. O estudo e escolha de métodos de como analisar e calcular as forças que estão no sistema presente poderão andar lado a lado com o profissional no momento da concepção do projeto da barragem. Os métodos rigorosos para os autores supracitados foram superiores ao método de Jambu e Fellenius.

3.5 Comparação dos autores

Os resultados obtidos foram os fatores de segurança para a barragem, variando os métodos de estabilidade de taludes, em rigorosos e não rigorosos. As condições analisadas foram para o caso de operação normal a considerando o nível de água máximo normal.

Ao observar o gráfico da Figura 3, pode-se verificar que os coeficientes de segurança dos métodos rigorosos de Spencer e Morgenstern-Price e não rigorosos de Jambu e Fellenius, é possível observar que os métodos rigorosos se mostraram consideravelmente superiores para as 2 primeiras barragens e coincidentes nas demais.

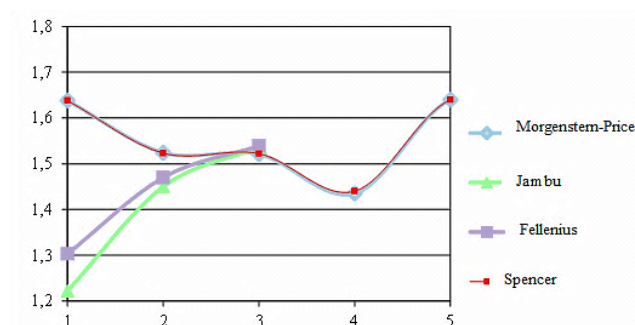


Figura 3. Comparação dos autores selecionados. Fonte: Autoras, 2021.

4 Conclusão

Diante do confronto dos dados revisados, é notável que o método escolhido interfere no resultado do Fator de Segurança, tanto para os métodos rigorosos como para os não rigorosos, sendo de responsabilidade de o engenheiro determinar qual o método mais adequado para a se adotar.

Importante ressaltar que métodos rigorosos tendem a apresentar valores de FS maiores na maioria dos casos, mas não sendo uma regra geral, visto que satisfazem todas as três equações de equilíbrio da estática.

Por fim, a distinção entre métodos de Fellenius, Jambu Morgenstern-Price e Spencer está na superfície de ruptura utilizada e os parâmetros utilizados para realizar o cálculo das forças envolvidas na estabilidade.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás que apoiaram a pesquisa desenvolvida neste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, Lee W.; Lee, T. S.; Sharma, S.; Glenn, M. (2002). *Slope stability and stabilization methods*. Nova Iorque: John Wiley & Sons.
- Antunes, I. S., de Lima, A. V. S., da Silva, J. C., Queiroz, R. F. R., & Silvani, C. (2018) Análise da estabilidade de taludes através de métodos rigorosos e não rigorosos. In: III Congresso Nacional de

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Pesquisa e Ensino em Ciências, Campina Grande. *Anais... III CONAPESC...* Campina Grande: Realize Editora, 4 p. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/42883>>. Acesso em: 05 de maio de 2021.
- Barbosa, M. H. B. (2019) *Estabilidade de Taludes de Barragens: Comparação entre Análises por Métodos de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49 p.
- Das, M. Braja. (2007) *Fundamentos da Engenharia Geotécnica*. In: Estabilidade de taludes. 6ª Ed. São Paulo: Thomson Learning.
- Duncan, J. M. (1996) State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, v. 122, p. 577-596.
- Ferreira, J. L. (2012) *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Haramboure, Y. G.; Berengue, I. F.; Tristá, J. G. (2021) Efecto de desembalse en la estabilidad de presas de tierra: dos casos de estudio en Cuba. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, La Habana, v. 42, n.1, p. 42-53.
- Lima, R. P.; Elmiro, M. A. T.; Nero, M. A.; Temba, P. da C.; Fonseca, B. M.; Castiglione, L. H.G. (2021) Assessment of digital terrain models in dam break simulation studies. *Bulletin of Geodetic Sciences*, v.2, n. spe: elocation: 2021005, 2021. DOI: 10.1590/s1982-21702021000100005.
- Santos Junior, A. E. (2019) *Análise probabilística da estabilidade de taludes em barragens de terra no estado do Ceará*. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús.
- Soares, B. R. (2017) *Análise Probabilística de estabilidade de taludes de barragens de terra no Estado do Ceará*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 136 p.
- Viterbino Neto, L.; Freitas, G. (2020) Análise de estabilidade de taludes de barragens de terra. *Revista Científica Multidisciplinar* do CEAP, v. 2, n. 1, p. 1-10.
- Rossi, C. L. C. U.; Marques, M. G.; Teixeira, E. D.; Melo, J. F.; Ferla, R.; Prá, M. D. (2021) Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 26, e02. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200066>.