



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID32479>



Avaliação da estabilidade de uma barragem de rejeitos de mineração de ferro

Evaluation of the stability of an iron mining tailings dam

Lucas Andrade e Souza¹; Thiago Bomjardim Porto²; Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão³; Andréa Nascimento Vecchi⁴; Guilherme Pereira Pinto⁵

¹ CEFET-MG, Campus Araxá/Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá/MG, Brasil. Email: lucasandradeesouza@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5389-5552>

² CEFET-MG, Campus Araxá/Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá/MG, Brasil. Email: thiago.porto@cefetmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3355-0477>

³ PUC-Rio, Campus Rio de Janeiro/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro/MG, Brasil. Email: sayao@puc-rio.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4281-1341>

⁴ PUC-Rio, Campus Rio de Janeiro/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro/MG, Brasil. Email: pucrio.vecchi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9641-7112>

⁵ UERJ, Rio de Janeiro/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro/MG, Brasil. Email: guilhermeppinto@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1338-4600>

Resumo: Na prática de engenharia, a avaliação da estabilidade de barragens é comumente feita de maneira determinística, com uso de Métodos de Equilíbrio Limite. Porém, os métodos probabilísticos vêm tendo aceitação crescente como ferramenta complementar de análise, para representar a condição real da variabilidade dos solos no campo. Assim, o artigo apresenta uma avaliação da estabilidade de uma barragem de rejeito alteada para montante, na região de mineração de ferro em Minas Gerais, Brasil. Na pesquisa, utilizou-se o programa comercial Slide 2D da empresa Rocscience. Os estudos de estabilidade adotados no presente trabalho tiveram por base o Método de Equilíbrio Limite proposto por Morgenstern-Price (1965). Foram realizadas análises probabilísticas, utilizando-se os métodos clássicos de Monte Carlo (MC) e FOSM (First Order Second Moment), obtendo-se um fator de segurança (FS) determinístico na ordem de 1,06, para a condição da barragem anterior à ruptura. O valor da probabilidade de ruptura (Pr) pelo Método FOSM foi de 27,0% (ou 1:3,7), com um índice de confiabilidade (β) igual a 0,621. Pelo Método MC foi obtido Pr = 25,6% (ou 1:3,9) e β = 0,705. Verifica-se, portanto, que ambos os métodos indicaram uma condição precária da estabilidade da barragem, que veio a sofrer ruptura em 2019.

Palavras-chave: Geotecnia; Segurança hídrica; Extração mineral.

Abstract: In engineering practice, the evaluation of dam stability is commonly done in a deterministic way, using Limit Equilibrium Methods. However, probabilistic methods have been increasingly accepted as a complementary analysis tool to represent the real condition of soil variability in the field. Thus, the article presents an evaluation of the stability of an upstream tailings dam, in the iron mining region of Minas Gerais, Brazil. In the research, the commercial program Slide 2D from the company Rocscience® was used. The stability studies adopted in the present work were based on the Limit Equilibrium Method proposed by Morgenstern-Price (1965). Probabilistic analyzes were carried out, using the classic methods of Monte Carlo (MC) and FOSM (First Order Second Moment), obtaining a deterministic factor of safety (FS) in the order of 1.06, for the condition of the previous dam rupture. The value of probability of rupture (Pr) by the FOSM Method was 27.0% (or 1:3.7), with a reliability index (β) equal to 0.621. Using the MC Method, Pr = 25.6% (or 1:3.9) and β = 0.705 were obtained. It appears, therefore, that both methods indicated a precarious condition of the stability of the dam, which broke in 2019.

Keywords: Geotechnics; Water security; Mineral extraction.

1. Introdução

As barragens de terra são estruturas essenciais no contexto evolutivo da humanidade, tanto pelo seu papel no desenvolvimento econômico, quanto no fomento de novas tecnologias para viabilizar sua construção (LEITE, 2019). Seu uso é bastante diversificado, com destaque para contenção de rejeitos de mineração, irrigação, energia hidrelétrica, abastecimento de água e controle de enchentes. De acordo com o International Commission on Large Dams - ICOLD (2019), existem cerca de 58.000 barragens ao redor do mundo, das quais 65% são barragens de terra.

O rompimento de barragem pode causar impactos ambientais, econômicos e sociais extremamente prejudiciais (HICKS, LI, 2018) para a sociedade. Entre os principais fatores que causam ruptura de barragens estão: patologias pertinentes à fundação; projeto inadequado dos extravasores; instabilidade dos taludes; falta de controle da erosão; deficiência na inspeção e no monitoramento e, por fim, falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura (ICOLD, 2001). Quando se busca determinar as causas do rompimento de barragens, a estabilidade dos taludes de montante e de jusante compõem uma das questões mais críticas na gestão de segurança destas estruturas. Estes taludes devem ser analisados quanto às várias condições possíveis que podem levar à sua instabilidade.

Portanto, diante da importância das barragens, é necessário identificar e gerenciar com precisão os riscos a que estão sujeitas essas estruturas (BOWLES *et al.*, 2011). Nas últimas décadas, tem-se tornado crescente o número de estudos desenvolvidos que visam avaliar a condição de segurança de barragens (HARIRI-ARDEBILI, 2018), principalmente no que tange a estabilidade de taludes. Embora a maioria destes estudos tenham se concentrado na análise determinística, há uma ascendente tendência de interesse em usar métodos probabilísticos para verificar a estabilidade de estruturas geotécnicas, como evidenciados por Sandroni e Guidicini (2022); Sousa (2021); Braga (2019); Oliveira (2018); Vecchi (2018); Araújo (2018); Silva (2015); Sayão *et al.*, (2012); Flores (2008); Fabrício (2006); Guedes (1997), Dell'Avanzi (1995); Sandroni e Sayão (1992).

Abordagens probabilísticas são instrumentos importantes para quantificar as incertezas inerentes a complexidade da construção de uma barragem de terra (FERNANDES, 2020). Tal abordagem traz uma gama de benefícios, os quais norteiam a contabilização estatística da variabilidade do terreno (solo e/ou rocha), como também corrobora para resultados mais robustos, principalmente no que tange a probabilidade de falha (P_f), a distribuição/estatística do fator de segurança (FS) de barragens e, finalmente, os índices de confiabilidade (β) são firmados para que informações complementares sejam incluídas ao FS único obtido pela análise determinística tradicional (GUO X *et al.*, 2018).

Desta forma, este artigo apresenta um estudo do uso dos métodos probabilísticos em análises envolvendo a segurança de estruturas geotécnicas, bem como compara seus resultados, fundamentando-se em um caso real de uma barragem de rejeitos de minério de ferro alteada pelo método de montante.

2. Metodologia

2.1 Seção-tipo da Barragem

Para as análises realizadas no presente trabalho, entre as seções (Figura 1) estabelecidas pelo projetista, selecionou-se a mais desfavorável em termos de estabilidade, ou seja, a que representa a maior altura do maciço, denominada Seção 4 no projeto (TUV SUD, 2018), como pode ser visto na Figura 2.

O nível da linha freática (Figura 2) estabelecida na seção de estudo foi obtido através da análise dos instrumentos instalados na estrutura, sendo eles: indicadores de nível d'água e piezômetros. As análises de estabilidade são válidas para esta condição, caso haja alteração nas informações hidrogeológicas da barragem, na seção utilizada, é necessário reavaliação.

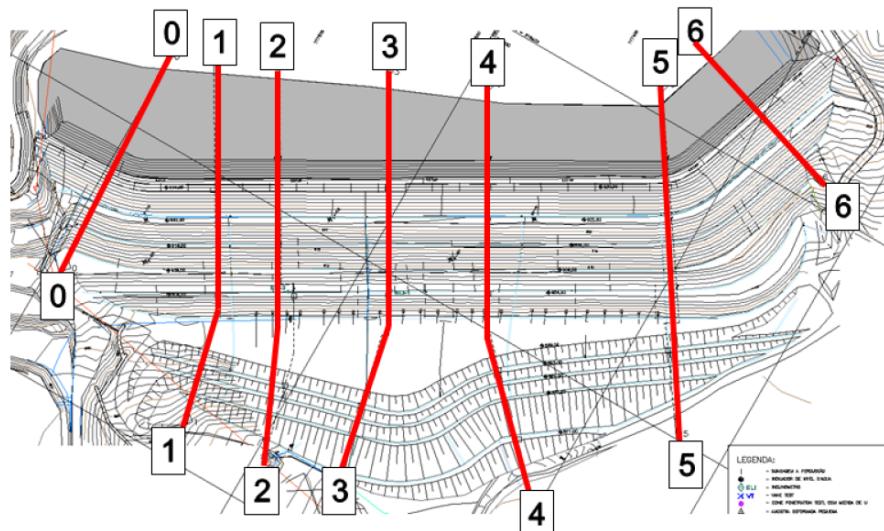


Figura 1 – Seções de Projeto para a Barragem em Estudo.

Fonte: TUV SUD (2018).

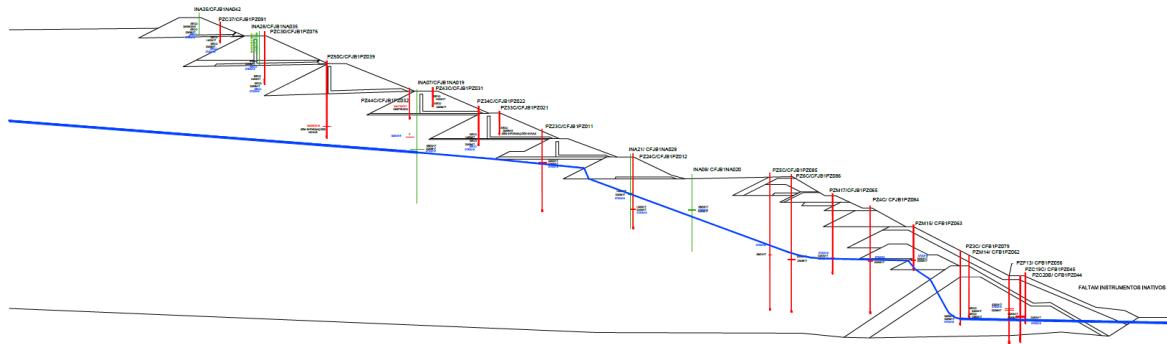


Figura 2 – Seção 4 com a Disposição da Linha Freática.

Fonte: TUV SUD (2018).

2.2 Parâmetros geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos (Tabela 1) utilizados nas análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas foram obtidos através de campanhas de investigações geológico-geotécnicas e ensaios laboratoriais realizadas ao longo dos últimos anos, referenciados no documento “Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB)” elaborado em 2018 pela TUV SUD.

Tabela 1 – Parâmetros Geotécnicos Utilizados nas Análises de Estabilidade.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (graus)	S _u /σ'v ₀	
				pico	residual
Solo Residual	20	16	30	-	-
Solo Compactado	19	10	30	-	-
Rejeito Compactado	28	0	37	-	-
Minério Ultrafino	25	0	30	-	-
Rejeito Saturado	26	-	-	0,26	0,09

Rejeito	26	0	35	-	-
---------	----	---	----	---	---

Fonte: TUV SUD (2018).

Em que:

γ - Peso específico em kN/m³;

c' - Coesão efetiva em kPa;

ϕ' - Ângulo de atrito interno efetivo em graus;

s_u/σ'_{v0} - Normalização da resistência não-drenada.

2.3 Análise de Estabilidade Determinística

As análises de estabilidade sob condições não-drenadas foram realizadas com auxílio do software Slide 2D, versão 9.0, da empresa Rocscience® e foram processadas considerando o método Morgenstern-Price (1965), por equilíbrio limite, adotando o modelo de ruptura de Mohr-Coulomb, com verificação da superfície de ruptura da esquerda para a direita. Foram adotados os parâmetros efetivos apresentados na Tabela 1. A superfície de ruptura foi obtida automaticamente pelo software.

2.4 Análise de Estabilidade Probabilística

A confiabilidade da estabilidade probabilística é medida através de um índice de confiabilidade (β) e pela probabilidade de falha (P_f), que de acordo com Flores (2008) é definida como a probabilidade de um valor de (FS) ser menor que 1. A Tabela 2 exibem diferentes níveis de aceitação de P_f e β apresentados pelo US Army Corps of Engineers (1995) e Dell'Avanzi e Sayão (1998), respectivamente.

Tabela 2 – Índices de Confiabilidade e Probabilidade de Falha.

Nível de desempenho	Índice de Confiabilidade (β)	Probabilidade de Falha (P_f)
Alto	5,0	3,0E-07
Bom	4,0	3,0E-05
> Média	3,0	1,3E-03
< Média	2,5	6,0E-03
Pobre	2,0	2,3E-02
Insatisfatório	1,5	7,0E-02
Perigoso	1,0	1,6E-01

Fonte: USACE (1995); DELL'AVANZI, SAYÃO (1998).

Segundo Vecci (2018), existem vários métodos probabilísticos para análise de estabilidade, os mais corriqueiros são o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (First Order Reliability Method, FORM), Método de Análise de Confiabilidade de Primeira Ordem e Segundo Momento (First Order Second Moment, FOSM), Método das Estimativas Pontuais (PEM) e o Método de Monte Carlo (MC). Neste trabalho, os métodos probabilísticos utilizados foram: FOSM e MC.

2.4.1 FOSM

De acordo com Baecher e Christian (2003), o método FOSM é simples e pode ser dividido nas seguintes etapas: Identificação dos parâmetros variáveis e que afetam o resultado do fator de desempenho; Obtenção os dados estatísticos, como por exemplo a média, a variância e, caso exista, o coeficiente de correlação das variáveis em estudo; Cálculo do resultado da função do indicador de desempenho a partir do valor médio das propriedades de interesse, utilizando as análises determinísticas; Cálculo das derivadas parciais da função de cada variável; Obtenção da influência de cada variável à função; Cálculo da variância da função, do índice de confiabilidade e da probabilidade de falha do indicador de desempenho por meio da aplicação dos dados estatísticos à distribuição adequada ao problema; Análise dos resultados e da contribuição dos parâmetros de interesse no Fator de Segurança.

O fator de segurança de uma estrutura geotécnica é considerado uma função de desempenho $FS(\bar{X})$, obtida a partir da média (\bar{X}) dos parâmetros geotécnicos ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) definidos como variáveis independentes no cálculo do FS, exemplificados como coesão, ângulo de atrito, peso específico, resistência não-drenada, entre outros.

Demonstrando-se a expansão da função de desempenho $FS(\bar{X})$ através da série de Taylor ao redor do valor médio (\bar{X}), tem-se a equação 1:

$$FS(X) = FS(\bar{X}) + \frac{FS'(\bar{X})}{1!} (X - \bar{X})^1 + \frac{FS''(\bar{X})}{2!} (X - \bar{X})^2 + \dots \quad \text{equação 1}$$

Onde $FS'(\bar{X})$ e $FS''(\bar{X})$ representam, respectivamente, a primeira e segunda derivadas. Após truncar-se a equação 1 no segundo momento da série, ou seja, na derivada de primeira ordem e efetuar manipulação algébrica, o resultado se dá por:

$$FS(X) - FS(\bar{X}) = FS'(\bar{X})(X - \bar{X})^1 \quad \text{equação 2}$$

Ao elevar a equação 2 ao quadrado e, novamente, efetuar manipulação algébrica, obtém-se a variância do fator de segurança, como mostra a equação 3.

$$V[FS(X)] = (FS'(\bar{X}))^2 \cdot V(X) \quad \text{equação 3}$$

Como é de conhecimento, a obtenção do fator de segurança envolve diversas variáveis independentes entre si, e não uma única, como pode ser visto na equação 3. Portanto, de acordo com Harr (1987), a real variância (equação 4) do FS é calculada através do somatório do produto entre o quadrado das derivadas parciais do FS em relação a cada parâmetro tido como variável e sua própria variância.

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta FS}{\delta x_i} \right)^2 \cdot V[x_i] \quad \text{equação 4}$$

A vantagem de empregar o método FOSM é a necessidade de se conhecer apenas os valores dos momentos das distribuições estatísticas (média e desvio padrão) dos parâmetros em análise (FALCÃO et al., 2020). A principal deficiência do FOSM é que a exigência de resolver derivadas parciais pode ter desdobramentos complexos e/ou impossíveis.

Como a solução destas derivadas não é um procedimento simples, autores como Christian et al. (1992), Sandroni e Sayão (1992), Dell’Avanzi (1995), Vecchi (2018) e Braga (2019) optaram pela aproximação das derivadas parciais recorrendo a metodologia das diferenças divididas, variando-se um parâmetro por vez, fixando os demais, obtendo-se, portanto, um valor de FS para cada variação de parâmetro. Assim sendo, para n variáveis independentes, o método FOSM estabelece $n+1$ análises, ou seja, uma para os valores médios e outras n para determinar as derivadas ($\delta FS / \delta x_i$) de cada variável independente (FARIAS, ASSIS, 1998). A relação determinada pela divisão entre a variação do valor de FS e a variação de parâmetro (δx_i) que ocasionou esta alteração no FS subsidiam a aproximação de sua derivada parcial em relação a cada parâmetro (VECCI, 2019), como indica a equação 5.

$$\frac{\delta FS}{\delta x_i} = \frac{FS(x_i + \delta x_i) - FS(\bar{x}_i)}{\delta x_i} \quad \text{equação 5}$$

2.4.2 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é uma técnica de amostragem estatística que consiste na geração de valores aleatórios suficientes para descrever adequadamente a distribuição de probabilidade $F(X)$, de modo a tornar a amostra representativa da população. A precisão da estimativa aumenta à medida que o tamanho da amostra e o número de análises realizadas se aproximam do infinito (VECCI, 2018). Este consiste nas seguintes etapas (KRAHN, 2004): Determinação de um método analítico para análise de estabilidade; Especificação dos parâmetros de entrada como uma função de distribuição de probabilidade; Realização de N (equação 6) análises determinísticas do modelo do sistema e verificação da eventual

ocorrência ou violação do estado limite; Cálculo do índice de confiabilidade e probabilidade de falha com base no número de fatores de segurança menores que um.

$$N = \left(\frac{h_{\alpha/2}^2}{4\varepsilon^2} \right)^n \quad \text{equação 6}$$

Onde:

N - Número mínimo de simulações para um determinado nível de confiança desejável (necessário);

$h_{\alpha/2}$ - Índice em função do nível de confiança desejável;

ε - Máximo erro permitido (em função do nível de confiança);

n - Número de variáveis.

O índice em função do nível de confiança desejável foi determinado por Harr (1987), como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Índices de Confiança para Distribuição Normal.

Nível de Confiança (%) (1- α)	$h_{\alpha/2}$	Nível de Confiança (%) (1- α)	$h_{\alpha/2}$
85,00	1,44	99,50	2,81
90,00	1,64	99,73	3,00
95,00	1,96	99,90	3,29
95,45	2,00	99,99	3,89
98,00	2,33	99,994	4,00
99,00	2,58	-	-

Fonte: HARR (1987).

Empregado para avaliar a segurança de estruturas geotécnicas, como barragens de rejeitos, este método admite que se reedite o comportamento de uma variável aleatória dependente (FS), e se obtenha as probabilidades de falha, $P_f = P(FS < 1)$, de uma barragem, desde que se disponha de sua geometria em escala, a média, desvio padrão e função característica de cada parâmetro variável (γ, c', ϕ') que influencie no Fator de Segurança (VECCI, 2018).

Para aplicação do método de Monte Carlo, considerou-se um nível de confiança de 85% e três variáveis, portanto, pela Equação 2, o número de simulações (N) foi de 12231. As simulações foram realizadas com o software Slide 2D, da empresa Rocscience ®.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise Determinística

Conforme mencionado anteriormente, as análises de estabilidade determinísticas foram realizadas pelo método de Morgenstern-Price (1965). A seguir são explicitados o fator de segurança, bem como o diagrama com a superfície de ruptura.

Observa-se na Figura 3 que, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 3, o fator de segurança sob condição não-drenada ($FS = 1,058$) se encontra abaixo do indicado na Resolução 95/2022, elaborada pelo órgão regulamentador e fiscalizador de barragens de mineração no Brasil, a Agência Nacional de Mineração (ANM), cujo valor mínimo é de 1,1. Em uma pesquisa realizada com a mesma seção-tipo da barragem em análise neste trabalho, Braga (2019) obteve um FS de 1,047 utilizando também o método de Morgenstern-Price.

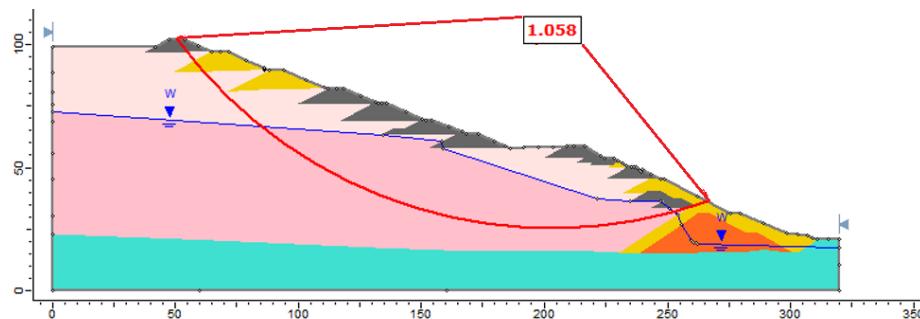


Figura 3 – Análise de Estabilidade Determinística sob Condição Não-Drenada.

Fonte: Autores (2023).

Doravante os dados refletidos em ambos os estudos, nota-se que o valor do FS encontrado neste é semelhante ao valor de FS encontrado pelo autor supracitado, o que valida a presente análise de estabilidade determinística, em que, ainda, pode-se explicar a ligeira variação dos valores tomando como base a diferença incorporada entre as versões do software utilizado.

A superfície de ruptura crítica obtida tem comportamento global, iniciando-se pela crista do último alteamento e se desenvolvendo ao longo do rejeito, porém, sem interceptar a fundação, expondo as condições críticas de segurança do talude de jusante da barragem em análise.

3.2 Análise de Estabilidade Probabilística

Através da análise de estabilidade probabilística feita, inicialmente, pelo método FOSM, com variações de $\pm 10\%$ para cada parâmetro médio, conforme indicado por Dell’Avanzi (1995), foi possível identificar quais parâmetros geotécnicos que mais influenciaram na probabilidade de falha. Destacaram-se as variáveis s_u/σ'_{v0} do rejeito saturado, o ângulo de atrito do rejeito e o peso específico do rejeito saturado, com influência de 94,81%, 2,58% e 1,93%, respectivamente. Deste modo, ao realizar-se a análise pelo método de Monte Carlo, foi factível utilizar os parâmetros que tiveram uma maior interferência na Pf.

O resultado obtido referente a probabilidade de falha para o método FOSM foi maior do que o encontrado para Monte Carlo, o que corrobora com o estudo realizado por Silva (2015), assim como por Vecchi (2018) e Araújo (2018), onde os dois primeiros correspondem a análises de estabilidade probabilísticas em taludes de mina e o terceiro em barragem.

Os resultados das análises feitas pelo Método FOSM e Monte Carlo foram, na devida ordem: [$\beta=0,621$; $P_f=27\%$] e [$\beta=0,705$; $P_f=26\%$]. As probabilidades de falha e os índices de confiabilidade obtidos para ambos os métodos (FOSM e MC) se enquadram na faixa “perigoso”, tanto para os valores propostos por USACE (1995), quanto por Dell’Avanzi e Sayão (1998), apresentados na Tabela 2.

4. Considerações Finais

Para o presente estudo, o valor de β obtido por MC (0,705) foi ligeiramente maior do que o encontrado pelo FOSM (0,621), porém, tal diferença, teve um impacto de apenas 1% na probabilidade de falha, logo, verifica-se, que ambos os métodos de análise probabilística indicaram uma condição precária da estabilidade da barragem, que veio a sofrer ruptura em 2019.

Referências

- ARAUJO, M. B. Considerações Sobre Análise Probabilística em Estabilidade de Taludes de Barragem. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- BAECHER, G.B., CHRISTIAN, J.T. *Reliability and statistics in geotechnical engineering*, John Wiley & Sons, New York. 2003.

- BOWLES, D; RUTHFORD, M; ANDERSON, L. Risk assessment of success dam, California: evaluation of operating restrictions as an interim measure to mitigate earthquake risk. In: *Geo-Risk 2011: risk assessment and management*, 586–599, 2011.
- BRAGA, P. C. V. *Análise probabilística de Estabilidade de uma Barragem de Rejeito*. 73f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2019.
- DELL'AVANZI, E. *Confiabilidade e Probabilidade em Análises de Estabilidade de Taludes*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1995.
- DELL'AVANZI, E., SAYÃO, A.S. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: *COBRAMSEG*. Brasília, Anais. Brasília, v. 2, p. 1289-1295, 1998
- DUNCAN, J. M; WRIGHT, S. G. *Soil strength and slope stability*. 1^a edição, New Jersey, John Wiley e Sons, 2005.
- EL-RAMLY, H. *Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice*. Thesis, Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001.
- FABRÍCIO, J. V. F. *Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- FERNANDES, R. B. *Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA*. 241f. Tese (Doutorado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. 2020.
- FLORES, E. A. F. *Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.
- GERSCOVICH, D. *Estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- GUEDES, M. C. S. *Considerações sobre Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.
- GUO, X; DIAS, D; CARVAJAL, C; PEYRAS, L; BREUL, P. Reliability analysis of embankment dam sliding stability using the sparse polynomial chaos expansion. *Engineering Structures*, v. 174, 295-307, 2018.
- HARIRI-ARDEBILI, M.A. Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v.31, n.1, 806-831, 2018.
- HARR, M.E. *Reliability: Based Design in Civil Engineering*. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA, 1987, 291p.
- HICKS, M.A; Y. LI. Influence of length effect on embankment slope reliability in 3D. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 42, n. 7, 891-915, 2018.
- INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. *Tailings dams: risk of dangerous occurrences: Lessons learnt from practical experiences*. Paris: UNEP/ICOLD, 2001.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. Dams' safety is at the very origin of the foundation of ICOLD. Paris, 2019.
- KRAHN, J. *Stability Modeling with SLOPE/W*. First Ed., GEO-SLOPE/W International Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- KUO, J. T., YEN, B. C., HSU, Y. C., LIN, H. F. Risk analysis for dam overtopping: Feitsui reservoir as a case study. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 8, 955-963, 2007.

- LEITE, S. R. *Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy*. 197f. Dissertação (Mestrado Profissional em Computação Aplicada). Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- MALKAWAI, AIH; HASSAN, W.F; SARMA, S.K. Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 127, n. 8, 688-698, 2001.
- MORALES, M. S. T. *Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas-não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.
- MORGENSTERN, N.R; PRICE, V.E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, v. 15, 79-93, 1965.
- OLIVEIRA, A. L. R. V. *Avaliação da segurança de um quebra-mar sobre argila mole*. Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- SANDRONI, S.; GUIDICINI, G. *Barragens de terra e enrocamento*. São Paulo. Oficina de Textos, 2022. 168p.
- SANDRONI, S. S., SAYÃO, A. S. F. J. Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de Taludes. *1ª COBRAE*, Rio de Janeiro, ABMS, v.2, 523-535, 1992.
- SAYÃO, A. S. F. J., SANDRONI, S.S., FONTOURA, S.A.B., RIBEIRO, R.C.H. Considerations on the probability of failure of mine slopes. *Soils and Rocks*, v. 35, n. 1, 31-37, 2012.
- SILVA, C. C. *Análise de Estabilidade de um talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística*. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- SOUZA, T.F.P. *Abordagem Monte Carlo para a Análise Probabilística da Estabilidade de Taludes Durante Rebaixamento Rápido de Reservatório*. 94f. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2021.
- TÜV SÜD BUREAU. GRG. Gestão de Riscos Geotécnicos. Revisão periódica de segurança de barragem Mina Córrego Feijão – barragem I. Relatório Técnico. 2017.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Reliability analysis and risk assessment for seepage and slope stability failure modes for embankment dams. *Engineering Technical Letter*, n. 1110-2-561, Washington, D.C, 2006.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Introduction to Probability and Reliability Methods for Use In Geotechnical Engineering. *Corps of Engineers*, Washington, DC, 1995.
- VECCI, A. N. *Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração*. 82f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.