XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/15

Avaliação da Estabilidade de uma Barragem Hipotética em Final de Construção: Análises Determinísticas e Probabilísticas Utilizando a Metodologia FOSM

Tayanne Pimenta Magalhães
Mestranda em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, tayannepm3@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante
Professor Associado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A engenharia tradicional considera predominantemente a abordagem determinística para a avaliação da estabilidade de estruturas geotécnicas, existindo um pré-conceito generalizado de exatidão. Entretanto, os parâmetros dos materiais e os carregamentos presentes nas estruturas podem conter incertezas associadas a variabilidades. Tais incertezas estão relacionadas a uma probabilidade de falha da estrutura, que é de extrema importância que seja avaliada. A abordagem probabilística objetiva avaliar a variabilidade de certo indicador de desempenho em função das variabilidades em seus dados de entrada. Dentre os métodos probabilísticos existentes, o Método da Aproximação de Primeira Ordem da Variância (FOSM) se destaca por se tratar de uma avaliação rápida e pelo fato de requerer apenas média e desvio-padrão dos dados de entrada. Além disso, a metodologia permite obter o peso de cada variável de entrada na variância final. Dessa forma, no caso da estabilidade, obtém-se as parcelas de variância causadas por cada um dos parâmetros envolvidos no cálculo do fator de segurança, permitindo estabelecer a importância relativa de cada um dos parâmetros, a fim de conduzir proposições de projeto adequadas. No presente trabalho, foi avaliada a estabilidade dos taludes de montante e jusante de uma barragem hipotética em cenário de final de construção, através de análises determinísticas e probabilísticas utilizando a metodologia FOSM. O estudo realizado mostra o peso de cada variável de entrada na variância final do fator de segurança. Ademais, o presente trabalho mostra que a barragem em estudo pode ser considerada satisfatória quando avaliada pela abordagem determinística, atendendo ao fator de segurança mínimo normativo para final de construção, enquanto apresenta uma probabilidade de falha superior ao recomendado pela literatura quando avaliada pela abordagem probabilística. Essa inconsistência está relacionada à desconsideração das incertezas dos parâmetros geotécnicos nas análises convencionais de estabilidade de taludes, proporcionando um falso senso de segurança quando analisadas isoladamente, o que evidencia a importância da abordagem probabilística aplicada aos problemas de engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade, Abordagem determinística, Abordagem probabilística, Probabilidade de falha.

ABSTRACT: Traditional engineering predominantly adopts the deterministic approach to evaluating the stability of geotechnical structures, with a widespread assumption of accuracy. However, material parameters and loads acting on the structures may contain uncertainties associated with variability. These uncertainties are associated with the probability of failure of the structure, which is extremely important to be evaluated. The probabilistic approach aims to assess the variability of a specific performance indicator as a function of the variability of its input data. Among the available probabilistic methods, the First-Order Second-Moment Method (FOSM) stands out because it is a quick assessment and only requires the mean and the standard deviation of the input data. In addition, this methodology enables the evaluation of the contribution of each input variable to the final variance. Thus, in the context of stability, the variance components caused by each parameter involved in the calculation of the factor of safety are obtained, allowing the establishment of the relative importance of each parameter in order to guide appropriate design proposals. In the present study, the stability of the upstream and downstream slopes of a hypothetical dam at the end-of-construction scenario was evaluated through deterministic and probabilistic analyses using the FOSM methodology. The study shows the contribution of each input variable to the final variance of the factor of safety. Furthermore, this research

shows that the studied dam can be considered satisfactory when evaluated using the deterministic approach, as it satisfies the minimum regulatory factor of safety for the end-of-construction scenario, although it presents a probability of failure higher than the values reported in the literature when assessed using the probabilistic approach. This inconsistency is associated with the disregard of uncertainties in geotechnical parameters in conventional slope stability analyses, which may lead to a false sense of safety when considered in isolation, thereby emphasizing the importance of the probabilistic approach applied to engineering problems.

KEYWORDS: Stability, Deterministic approach, Probabilistic approach, Probability of failure.

1 INTRODUÇÃO

Na tradicional abordagem determinística aplicada ao cálculo de fatores de segurança de estruturas geotécnicas, os dados de entrada, como parâmetros dos materiais e carregamentos, são assumidos constantes, não sendo considerada a variabilidade existente, induzindo a um falso conceito de exatidão.

Os parâmetros dos materiais e carregamentos podem conter incertezas naturais ou epistêmicas. Incertezas naturais ou implícitas são inerentes aos materiais e carregamentos, enquanto incertezas epistêmicas são decorrentes de erros e imprecisões dos processos de engenharia. A abordagem probabilística objetiva obter a variabilidade do indicador de desempenho em função das variabilidades em seus dados de entrada, estimando a probabilidade de falha da estrutura ou empreendimento, que é de extrema importância que seja avaliada.

2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DETERMINÍSTICAS E PROBABILÍSTICAS

2.1 Análises de Estabilidade pela Abordagem Determinística

Na engenharia tradicional, a abordagem determinística é predominantemente aplicada ao cálculo de indicadores de desempenho, como o fator de segurança. Essa abordagem assume os dados de entrada como valores constantes. Assim, o indicador de desempenho é um valor único, não abarcando a variabilidade de parâmetros e carregamentos. Nas análises de estabilidade determinísticas, o critério de falha é definido por:

$$FS \leq FS_{crit} \tag{1}$$

Onde *FS* é o fator de segurança (indicador de desempenho) e FS_{crit} é o valor crítico/limite do fator de segurança.

Avaliando a estabilidade geotécnica, há ocorrência de falha quando o fator de segurança é inferior a 1 (um). Contudo, nessa abordagem, incertezas comumente são incorporadas em margens de segurança.

2.2 Análises de Estabilidade pela Abordagem Probabilística

Os métodos probabilísticos avaliam a distribuição de probabilidade de uma variável dependente (indicador de desempenho), definida por uma função, com base nas distribuições estatísticas das variáveis independentes de entrada da função. Definida a variabilidade do indicador de desempenho, obtém-se a probabilidade de falha, uma vez definido o valor limite do evento de falha. Para o fator de segurança, tem-se:

$$pf = p(FS \leq 1) \tag{2}$$

Onde *pf* é a probabilidade de falha, *p* refere-se à probabilidade e *FS* é o fator de segurança.

Whitman (1984) delimitou regiões de probabilidade de falha aceitáveis, para diferentes tipos de obra, conforme as consequências de ruptura. Segundo o autor, no caso de barragens, uma probabilidade de falha até a ordem de 10^{-4} pode ser aceitável conforme as consequências de ruptura. Monteiro et al. (2017) citam que Wolff (1996) propôs, no caso de taludes críticos e taludes de barragens, uma probabilidade de ruptura da ordem de 10^{-5} como aceitável. Ademais, Monteiro et al. (2017) mencionam que a British Columbia Hydro (Nielsen et al., 1994) propôs probabilidades de ruptura de 10^{-4} como aceitáveis para barragens. Cabe ressaltar, contudo, que os valores apresentados pela literatura como probabilidades de falha aceitáveis devem ser avaliados de acordo com uma gestão de riscos, considerando as consequências de um evento de falha, como apresentado por Whitman (1984) e, atualmente, por meio de curvas de aceitabilidade do risco, que definem

zonas de riscos aceitáveis, zonas de atenção e intoleráveis, conforme uma política de riscos.

2.2.1 Método da Aproximação de Primeira Ordem da Variância (FOSM)

O Método da Aproximação de Primeira Ordem da Variância (FOSM) é um método probabilístico que decorre da expansão da Série de Taylor da equação da variância de uma variável dependente em função de variáveis independentes, onde a expansão é truncada nos termos de primeira ordem. A sigla FOSM significa *First-Order Second-Moment*, sendo que o método é dito de "primeira ordem" pois considera apenas a primeira derivada da Série de Taylor (linear), enquanto "segundo momento" refere-se à variância, que é o segundo momento estatístico. Pela metodologia FOSM, para *N* variáveis aleatórias não correlacionadas, é possível avaliar a função *F* para os pontos médios das variáveis independentes, bem como avaliar a variância de *F*:

$$\mathrm{E(F)} = \mathrm{F}(\bar{\mathrm{x}}_1, \bar{\mathrm{x}}_2, \dots, \bar{\mathrm{x}}_\mathrm{N}) \tag{3}$$

$$\mathrm{V(F)} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} \left(\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial \mathrm{x_i}}\right)^2 \times \mathrm{V(x_i)} \tag{4}$$

Onde *E(F)* é a expectância da função *F*, $\bar{x}_i$ é a expectância das variáveis x_i e *V(F)* é a variância da função *F*.

A metodologia consiste em variar separadamente cada parâmetro, verificando a variação no indicador de desempenho. As derivadas constantes da equação (4) podem ser estimadas por aproximação numérica:

$$\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial \mathrm{x_i}} = \frac{\mathrm{F}(\bar{\mathrm{x}}_\mathrm{i} + \Delta \mathrm{x_i}) - \mathrm{F}(\bar{\mathrm{x}}_\mathrm{i})}{\Delta \mathrm{x_i}} \tag{5}$$

Onde Δx_i é o incremento considerado na variação de cada variável aleatória independente.

O método requer a variância de cada variável aleatória. Diante de poucos dados amostrais, pode-se recorrer a coeficientes de variação reportados na literatura. O coeficiente de variação tem sido considerado um parâmetro característico da variável estatística, isto é, o desvio-padrão e a média de uma variável podem se alterar, mas a razão entre eles, o coeficiente de variação, é um valor bem mais constante (Assis et al., 2018). Na falta de dados com representatividade estatística, pode-se assumir que a média amostral seja um estimador da média populacional e o desvio-padrão pode ser estimado pelo coeficiente de variação (Assis et al., 2018).

Além de ser uma metodologia rápida, outras vantagens da metodologia FOSM são que ela requer apenas média e desvio-padrão dos dados de entrada, e obtém o peso das variáveis de entrada na variância do indicador de desempenho. Como desvantagens, tem-se que ela não contempla a variabilidade decorrente de possíveis mecanismos de ruptura e não estima a distribuição de probabilidade da variável dependente.

O índice de confiabilidade β indica o número de desvios-padrão que distancia a ruptura do fator de segurança obtido. Conforme Assis et al. (2018), qualquer que seja a distribuição de probabilidade do fator de segurança, a probabilidade de ruptura se relaciona monotonicamente com o índice β, sendo que, quanto maior for β, menor a possibilidade de ruptura, podendo-se admitir que o fator de segurança tem distribuição normal.

2.2.2 Método de Monte Carlo (MMC)

Segundo Assis et al. (2018), o Método de Monte Carlo (MMC) objetiva uma solução numérica aproximada da distribuição de probabilidade do indicador de desempenho, através de amostragens aleatórias de valores das variáveis independentes e sucessivas avaliações da função que define o indicador de desempenho. Conhecidas as distribuições estatísticas das variáveis independentes x_i, as amostragens aleatórias dos valores das variáveis devem ocorrer de forma independente, por meio da geração de números aleatórios uniformemente distribuídos para cada variável aleatória independente x_i e para cada simulação do cálculo da variável dependente *y*. Através da função matemática que rege a variável dependente em função das variáveis independentes, os valores da variável dependente são calculados. Repetindo-se um número (*N*) de simulações, tem-se uma amostra de valores discretos da variável *y*. Assim, pode-se calcular as estatísticas da amostra obtida (média, desvio-padrão, dentre outras), plotar o histograma de frequências dos valores da variável dependente *y*, obter o melhor ajuste de sua distribuição probabilística e calcular a probabilidade de falha.

Considerando uma amostra composta por *N* valores discretos da variável dependente, a média do indicador de desempenho, o desvio-padrão e a probabilidade de falha são definidos por:

$$E(y) = \sum \frac{y_i}{N} \tag{6}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum \frac{(y_i - E(y))^2}{N}} \tag{7}$$

$$pf = \frac{N_f}{N} \tag{8}$$

Onde y_i são os valores discretos da variável dependente obtidos; *E(y)* é o valor esperado (médio) da variável dependente *y*; *N* é o número de simulações de Monte Carlo; σ_y é o desvio-padrão da variável *y*; N_f é o número de simulações que geraram valores da variável *y* dentro do critério de falha; *pf* é a probabilidade de falha.

Segundo Assis et al. (2018), aumentando-se o número de simulações, tendendo a infinito, as estatísticas amostrais e a forma da distribuição de probabilidade tendem para o valor populacional, isto é, a solução pode ser considerada exata. Portanto, o método tem o potencial de ser exato. Ademais, outras vantagens são que o método contempla a variabilidade das variáveis de entrada simultaneamente, bem como das superfícies de ruptura, além de obter a distribuição de probabilidade da variável dependente. Como desvantagens, há o esforço computacional empregado e o fato de requerer distribuições estatísticas dos dados de entrada.

3 ESTUDO DE CASO

No presente trabalho, foi avaliada a estabilidade dos taludes de montante e jusante de uma barragem hipotética em cenário de final de construção. Foram utilizadas as abordagens determinística e probabilística considerando-se a metodologia FOSM, adotando-se o método de Monte Carlo para validação dos resultados.

Trata-se de uma barragem de seção homogênea, constituída por solo silto-argiloso compactado. A barragem apresenta altura de 100m e largura de crista igual a 12m. O talude de montante apresenta inclinação 1V:3,4H, enquanto os taludes de jusante têm inclinação 1V:3,1H, altura de 20m e largura das bermas de 6m. Como foi avaliado o cenário de final de construção, considerou-se que o maciço apresenta um comportamento não adensado e não drenado. A fundação possui a sequência litológica: solo areno-siltoso, solo argilo-siltoso e maciço rochoso. A seção típica do estudo é apresentada na Figura 1 e os parâmetros adotados encontram-se na Tabela 1. Os parâmetros foram definidos com base em materiais semelhantes reportados por Cruz (1996).

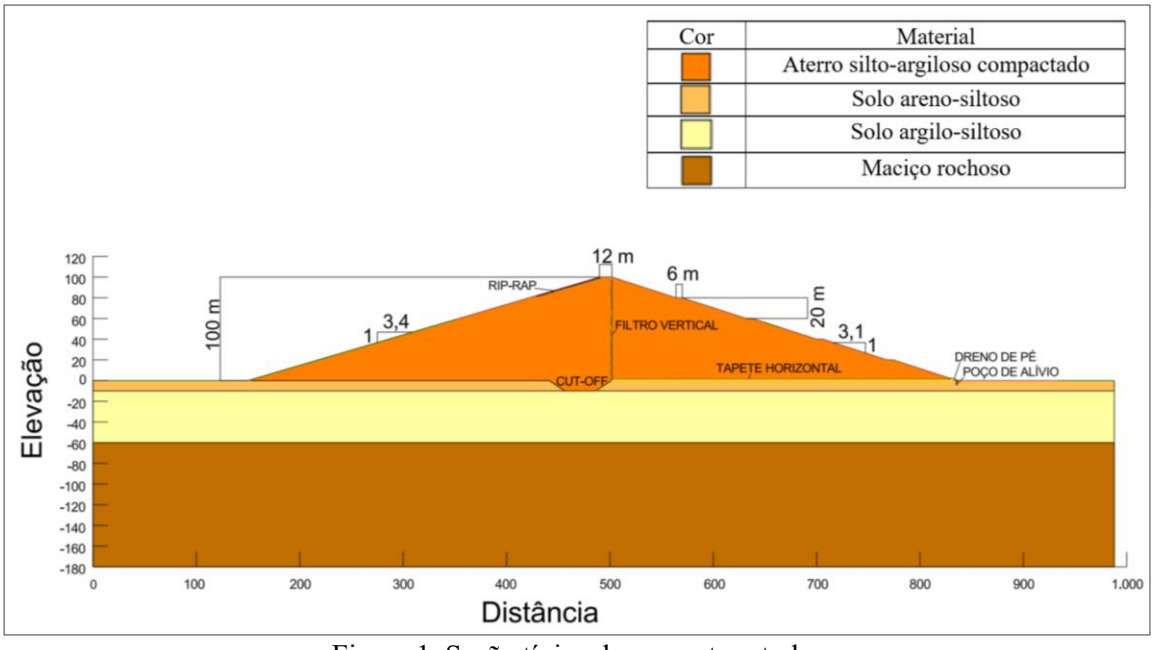


Figura 1. Seção típica do presente estudo.

Tabela 1. Parâmetros adotados para os materiais em estudo.

Material	Parâmetros	
Aterro silto-argiloso compactado (maciço e cut-off)	γ (kN/m³)	20
	Su (kPa)	250
Areia siltosa fina	γ (kN/m³)	19
	c' (kPa)	0
	ϕ' (º)	32
Argila siltosa mole a rija	γ (kN/m³)	20
	c' (kPa)	20
	ϕ' (º)	26
Maciço rochoso	Base rochosa impenetrável	

Para as análises de estabilidade realizadas pelas abordagens determinística e probabilística, foi utilizado o software GeoStudio 2D (SLOPE/W). As análises foram realizadas pelo método de Morgenstern-Price, considerando otimização da posição da superfície crítica.

Nas análises probabilísticas, os parâmetros considerados variáveis aleatórias independentes foram: peso específico e resistência não drenada do maciço; peso específico e ângulo de atrito efetivo do solo areno-siltoso; peso específico, coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo do solo argilo-siltoso. Como o solo areno-siltoso é um material caracterizado por coesão efetiva nula (c' = 0), esse parâmetro foi considerado constante, não sendo incluído como variável aleatória. Ademais, o maciço rochoso foi modelado como impenetrável.

Por se tratar de uma barragem hipotética, em que não se dispõe de dados amostrais do maciço e da fundação, foram considerados coeficientes de variação para os parâmetros com base nas referências compiladas por Assis et al. (2018) e apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Faixas e valores mais prováveis para os coeficientes de variação das propriedades do presente estudo (adaptado de Assis et al., 2018).

Propriedade	Faixas de CV e valor mais provável (%)	Referências
Peso específico γ	3-7 < 10 5*	Harr (1984); Kulhawy (1992); Uzielli et al. (2007)
Coesão c	20-80 40*	Baecher & Christian (2003)
Resistência não drenada Su	13-40 Triaxial UU → 10-30 Triaxial CU → 20-55 Triaxial CIU → 20-40 25*	Harr (1984); Kulhawy (1992); Lacasse & Nadim (1997); Phoon & Kulhawy(1999); Duncan (2000); Uzielli et al. (2007)
Ângulo de Atrito φ	2-13 5-15 10*	Harr (1984); Kulhawy (1992); Baecher & Christian (2003); Uzielli et al. (2007)

* Coeficientes de variação considerados mais prováveis segundo Assis et al. (2018).

Com base na Tabela 2, considerando os coeficientes de variação mais prováveis para os parâmetros em estudo conforme Assis et al. (2018), adotou-se coeficientes iguais a 5% para o peso específico, 40% para a coesão efetiva, 25% para a resistência não drenada e 10% para o ângulo de atrito efetivo. Assumindo os parâmetros das análises determinísticas como parâmetros médios das análises probabilísticas e com base nos coeficientes de variação adotados, obteve-se os desvios-padrão e as variâncias apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Determinação dos desvios-padrão e das variâncias das propriedades em estudo, para desenvolvimento das análises probabilísticas.

Material	Parâmetros médios		CV (%)	Desvio-padrão (s_i)	Variância [$V(X_i)$]
Aterro silto-argiloso compactado	γ (kN/m³)	20	5	1	1
	Su (kPa)	250	25	62,5	3906,25
Areia siltosa fina	γ (kN/m³)	19	5	0,95	0,9025
	ϕ' (º)	32	10	3,2	10,24
Argila siltosa mole a rija	γ (kN/m³)	20	5	1	1
	c' (kPa)	20	40	8	64
	ϕ' (º)	26	10	2,6	6,76

Para a metodologia FOSM, foi realizada a variação de cada variável aleatória separadamente, tendo sido adotados incrementos de 10% para as variáveis ($\Delta X_i = 0{,}1 \times X_i$). Avaliou-se os fatores de segurança quando realizadas as variações dos parâmetros isoladamente. Aplicada a metodologia, assumindo-se distribuição normal para o fator de segurança, calculou-se as probabilidades de falha dos taludes de montante e jusante.

No método de Monte Carlo, foi avaliada simultaneamente a variabilidade de todos os parâmetros da Tabela 3. Para as variáveis aleatórias, foram adotadas funções de distribuição de probabilidade normais, com exceção à coesão efetiva, para a qual foi considerada função de distribuição de probabilidade log-normal, conforme difundido na literatura para esse parâmetro. Os valores relativos mínimo e máximo representam a variação dos valores em torno da média da distribuição. Para os valores relativos mínimo e máximo, foi considerada, no caso de distribuição normal, uma variação de três desvios-padrão em torno da média, e, no caso de distribuição log-normal, três desvios-padrão da variável no espaço logarítmico, com subsequente transformação para o domínio original, a fim de abranger uma variação que compreende 99,7% dos valores das distribuições. Foram realizadas 10.000, 100.000, 1.000.000 e 10.000.000 de simulações de Monte Carlo.

4 RESULTADOS

Por meio das análises determinísticas realizadas, obteve-se fatores de segurança iguais a 1,31 para o talude de montante e 1,32 para o talude de jusante. Observa-se que os fatores de segurança obtidos pela abordagem determinística atendem ao fator de segurança mínimo especificado pela NBR 13028-2 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2025) para o cenário de final de construção ($FS_{mín}=1{,}3$).

A determinação da variância dos fatores de segurança dos taludes de montante e jusante, através da metodologia FOSM, foi apresentada, respectivamente, na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4. Determinação da variância do fator de segurança do talude de montante pela metodologia FOSM.

Talude de Montante								
Material	Parâmetro	X_i	δX_i	δFS_{ii}	$\delta FS_{ii}/\delta X_i$	$V[X_i]$	$(\delta FS_{ii}/\delta X_i)^2 \times V[X_i]$	(%)
Maciço	γ(kN/m³)	20	2	-0,12	-0,06	1	0,0036	3,3
	Su (kPa)	250	25	0,13	0,0052	3906,25	0,105625	96,7
Areia siltosa fina	γ(kN/m³)	19	1,9	0	0	0,9025	0	0,0
	ϕ' (º)	32	3,2	0	0	10,24	0	0,0
Argila siltosa mole a rija	γ(kN/m³)	20	2	0	0	1	0	0,0
	c' (kPa)	20	2	0	0	64	0	0,0
	ϕ' (º)	26	2,6	0	0	6,76	0	0,0
					Total	V[FS]	0,109225	100,0

Tabela 5. Determinação da variância do fator de segurança do talude de jusante pela metodologia FOSM.

Talude de Jusante								
Material	Parâmetro	X_i	δX_i	δFS_{ii}	$\delta FS_{ii}/\delta X_i$	$V[X_i]$	$(\delta FS_{ii}/\delta X_i)^2 \times V[X_i]$	(%)
Maciço	γ(kN/m³)	20	2	-0,12	-0,06	1	0,0036	3,3
	Su (kPa)	250	25	0,13	0,0052	3906,25	0,105625	96,7
Areia siltosa fina	γ(kN/m³)	19	1,9	0	0	0,9025	0	0,0
	ϕ' (º)	32	3,2	0	0	10,24	0	0,0
Argila siltosa mole a rija	γ(kN/m³)	20	2	0	0	1	0	0,0
	c' (kPa)	20	2	0	0	64	0	0,0
	ϕ' (º)	26	2,6	0	0	6,76	0	0,0
					Total	V[FS]	0,109225	100,0

Verifica-se que a variância do fator de segurança, V[FS], bem como as parcelas de variância causadas pela variação de cada parâmetro, foram iguais para os taludes de montante e jusante, tendo em vista que os taludes diferem pouco em inclinação, os materiais avaliados são os mesmos, as superfícies de ruptura e os fatores de segurança obtidos foram semelhantes e os critérios de variação dos parâmetros foram os mesmos.

Destaca-se que a alteração das propriedades da fundação não influenciou a variância dos fatores de segurança. A metodologia FOSM avalia a variabilidade dos parâmetros em torno das superfícies de ruptura obtidas inicialmente com os parâmetros médios, as quais não interceptaram a fundação, tendo ficado restritas ao maciço. Logo, apenas as propriedades do maciço (peso específico e resistência não drenada) contribuíram na variância dos fatores de segurança, sobretudo a resistência não drenada (96,7% de V[FS]), evidenciando o peso do parâmetro na variância dos fatores de segurança. Através da variância, obteve-se os desvios-padrão, os índices de confiabilidade β e as probabilidades de falha pela metodologia FOSM, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Resultados obtidos pela abordagem probabilística, utilizando-se a metodologia FOSM.

Talude	E [FS]	V[FS]	σ [FS]	β	pf
Montante	1,31	0,109225	0,330492	0,937995311	0,17412341
Jusante	1,32	0,109225	0,330492	0,968253224	0,16645896

Os resultados obtidos pelo método de Monte Carlo encontram-se na Tabela 7. Observando-se os valores das estatísticas e a forma de distribuição de probabilidade do fator de segurança com o aumento do número de simulações, verificou-se a convergência dos resultados, aceitando-se os resultados do método de Monte Carlo.

Tabela 7. Resultados obtidos pela abordagem probabilística, utilizando-se o método de Monte Carlo.

Talude	Número de Simulações	E [FS]	σ [FS]	β	pf
Montante	10.000	1,31	0,33255	0,93219	0,1763
	100.000	1,31	0,33045	0,94001	0,17609
	1.000.000	1,31	0,32976	0,94767	0,17377
	10.000.000	1,31	0,32969	0,94412	0,17441
Jusante	10.000	1,32	0,33533	0,96136	0,1698
	100.000	1,32	0,33323	0,96929	0,16834
	1.000.000	1,32	0,33248	0,97536	0,16655
	10.000.000	1,32	0,33288	0,97748	0,16595

Os resultados obtidos pelo método de Monte Carlo foram concordantes com os resultados da metodologia FOSM. Assim, pode-se afirmar que os resultados da metodologia FOSM foram validados pelo método de Monte Carlo, o qual pode ser considerado exato quando os valores das estatísticas e a forma da

distribuição de probabilidade da variável dependente se estabilizam, como verificado nos resultados obtidos.

Conforme os resultados dos métodos FOSM e Monte Carlo, os taludes de montante e jusante apresentam probabilidades de falha de cerca de 17%, correspondendo a uma razão de 1:6. Os resultados obtidos são da ordem de 10^{-1}, sendo superiores à probabilidade de falha da ordem de 10^{-5} aceitável para taludes de barragens por Wolff (1996) e à ordem de 10^{-4} considerada aceitável por Whitman (1984) e Nielsen et al. (1994).

5 CONCLUSÕES

Quando não se tem dados com representatividade estatística, é relevante recorrer a coeficientes de variação reportados na literatura, característicos das propriedades em análise, a fim de possibilitar a realização de análises probabilísticas. As análises probabilísticas associadas às determinísticas podem auxiliar na avaliação dos requisitos de segurança dos taludes de barragens, de maneira a tornar os riscos mais perceptíveis.

A barragem do presente estudo é considerada satisfatória pela abordagem determinística, enquanto as análises probabilísticas resultam em uma probabilidade de falha superior aos limites aceitáveis pela literatura. Essa divergência está relacionada à desconsideração das incertezas dos parâmetros nas análises de estabilidade convencionais, o que evidencia a importância da abordagem probabilística. Destaca-se, contudo, que as probabilidades de falha aceitáveis pela literatura não devem ser referências avaliadas isoladamente, devendo ser interpretadas no contexto da gestão de riscos. O risco contempla as consequências de um evento de falha, portanto, deve-se avaliar conjuntamente a chance de ocorrência de falha e suas consequências potenciais.

Diferentemente do método de Monte Carlo, a metodologia FOSM consiste na variação de cada variável aleatória separadamente e não contempla a variabilidade decorrente de potenciais superfícies de ruptura. Embora tais diferenças possam impactar a estimativa da probabilidade de falha, para a barragem em cenário de final de construção analisada, ambos os métodos apresentaram resultados concordantes. Trata-se de uma estrutura cuja estabilidade é condicionada pela resistência não drenada do maciço, de modo que as superfícies de ruptura são restritas a esse material. Nesse contexto, a variabilidade dos mecanismos de ruptura, bem como as variações simultâneas das variáveis de entrada, consideradas pelo método de Monte Carlo, não resultaram em superfícies mais críticas para o cenário avaliado, mantendo-se a superfície crítica associada aos parâmetros médios, utilizada na metodologia FOSM. Diante do estudo realizado, considera-se que a metodologia FOSM fornece resultados consistentes em situações nas quais a estabilidade da estrutura é condicionada por um material e um parâmetro específicos. Contudo, recomenda-se que sejam realizados estudos futuros para comparativos entre os resultados das duas metodologias em casos de estruturas e cenários caracterizados pela presença de diversos materiais críticos na seção típica, em que variações simultâneas de suas propriedades e/ou variações nas superfícies de ruptura possam afetar de forma significativa a probabilidade de falha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, A. P., Barbosa, T. J. E., Almeida, M. G. G., & Maia, J. A. C. (2018) *Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia.* Publicação G.AP-AA002/2018, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília / UnB, 288 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 13028-2. *Mineração – Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Parte 2: Requisitos*. Rio de Janeiro.

Cruz, P.T. (1996) *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*, 2a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 694 p.

Monteiro, F. F.; Carneiro, A. A.; Matos, Y. M. P.; Alelvan, G. M. (2017) *Análise Probabilística e Determinística da Estabilidade de Taludes em Barragem de Terra do Estado do Ceará*. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/336856226_Analise_Probabilistica_e_Deterministica_da_Estabilidade_de_Taludes_em_Barragem_de_Terra_do_Estado_do_Ceara >. Acesso em: 01 dez. 2025.

Whitman, R.V. (1984) Evaluating calculated risk in geothechnical engineering. *Journal of Geothecnical Engineering*, ASCE, 110(2), p. 145-189.