

Análise Geotécnica Probabilística da Estabilidade dos Taludes da Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS

Matheus da Costa Schwantz

Discente, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, Brasil, matheuscschwantz@gmail.com

Luiza Voss Vieira

Discente, Universidade Federal de Pelotas - UFPel, Pelotas, Brasil, luiza.voss.vieira13@gmail.com

Ingrid Milena Reyes Martinez Belchior

Professora, Universidade Federal de Pelotas - UFPel, Pelotas, Brasil, ingridbelchior17@gmail.com

Antônio Marcos de Lima Alves

Professor, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, Brasil, antonioalves@furg.br

RESUMO: A construção de barragens é vital para a infraestrutura global, porém, seu rompimento pode causar graves danos, especialmente sob eventos extremos de chuva, como vêm ocorrendo no Rio Grande do Sul, devido às mudanças climáticas. A Barragem Santa Bárbara, em Pelotas/RS, abastece cerca de 60% da cidade, armazenando 10 bilhões de litros de água. Nesse sentido, este estudo objetivou avaliar o risco de ruptura do talude de jusante da barragem sob condições de cheia, utilizando o software Slide2. Foram aplicados três métodos probabilísticos: Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), Método das Estimativas Pontuais (PEM) e Simulação de Monte Carlo (MSMC), considerando sete variáveis: peso específico, coesão e ângulo de atrito do barramento e da fundação e o nível do reservatório. As análises incluíram cinco métodos determinísticos de equilíbrio limite e cenários com e sem correlação entre variáveis. Os resultados mostraram que a barragem atende aos requisitos nacionais e internacionais de segurança, com baixas probabilidades de falha. Notou-se que os métodos FOSM e PEM superestimam a probabilidade de ruptura em relação ao MSMC. O fator de segurança probabilístico foi menor que o determinístico, refletindo a importância das análises de confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Estabilidade, FOSM, PEM, Simulação de Monte Carlo

ABSTRACT: The construction of dams is vital for global infrastructure; however, their failure can cause severe damage, especially under extreme rainfall events such as those occurring in Rio Grande do Sul due to climate change. The Santa Bárbara Dam, located in Pelotas/RS, supplies approximately 60% of the city's water, storing around 10 billion liters. In this context, this study aimed to assess the risk of failure of the dam's downstream slope under flood conditions using the Slide2 software. Three probabilistic methods were applied: First Order Second Moment Method (FOSM), Point Estimate Method (PEM), and Monte Carlo Simulation Method (MSMC), considering seven variables: unit weight, cohesion, and friction angle of both the dam body and the foundation, as well as the reservoir level. The analyses included five deterministic limit equilibrium methods and scenarios with and without correlation between variables. Results showed that the dam meets national and international safety standards, with low probabilities of failure. It was observed that the FOSM and PEM methods overestimated the probability of failure compared to MSMC. The probabilistic factor of safety was lower than the deterministic one, highlighting the importance of reliability analyses.

KEYWORDS: Dam, Stability, FOSM, PEM, Monte Carlo Simulation, Probability of Failure



1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens tem desempenhado um papel fundamental na infraestrutura global, fornecendo água potável, energia, controle de enchentes e recursos agrícolas essenciais (Silva, 2024). Devido à grande energia potencial gravitacional armazenada na água elevada, a ruptura de uma barragem pode levar a resultados catastróficos para a área a jusante (Hariri-Ardebili, 2018; Raman, Liu, 2019). Assim, o risco de falha não pode jamais ser anulado (Rossi *et al.*, 2021).

Além disso, eventos de chuva extrema podem danificar severamente as barragens ou até mesmo causar sua ruptura completa (ASDSO, 2015). No que diz respeito aos eventos climáticos extremos, há uma alta ocorrência de chuvas extremas que afetam a região sul do estado do Rio Grande do Sul (RS) (Cardoso *et al.*, 2022). A série de desastres naturais desencadeados pelos eventos climáticos extremos no estado do Rio Grande do Sul no ano de 2024 ilustra isso. As mudanças climáticas podem ser percebidas por meio de variações que ocorrem ao longo do tempo, como fortes tempestades, inundações, entre outros (Queiroga *et al.*, 2022).

O evento de chuva extrema causa um aumento das vazões dos cursos d'água, resultando na elevação do nível de água no reservatório a alturas que a barragem talvez nunca tenha experimentado antes. À medida que o nível do reservatório se eleva com o aumento das vazões de um evento de chuva extrema, as tensões estruturais e hidráulicas causadas pelo peso adicional da água no reservatório provavelmente excederão quaisquer níveis previamente experimentados na história da barragem. Essas tensões podem provocar instabilidade potencial da barragem, o que pode causar uma falha catastrófica total da barragem e o consequente vazamento de todo o reservatório de água armazenada (ASDSO, 2015).

Nesse sentido, avalia-se a Barragem Santa Bárbara, localizada na região sul do Estado do Rio Grande do Sul. A barragem Santa Bárbara é responsável pelo abastecimento de água em cerca de 60% do município de Pelotas, possuindo 352 hectares inundados e 359 hectares de proteção. O volume de água armazenado estimado é de 10 bilhões de litros de água. Ademais, a barragem foi apontada no Relatório de Segurança de Barragens de 2017 (ANA, 2018) como possuindo algum comprometimento estrutural importante.

Em virtude disto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o risco de ruptura da barragem dos taludes da barragem Santa Bárbara de Pelotas/RS, objetivando determinar a probabilidade de falha do reservatório em nível de cheia, sob diferentes metodologias de análise probabilística, como o Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), o Método das Estimativas Pontuais (PEM), e o Método de Simulações de Monte Carlo (MSMC). Para isso, utilizou-se o software comercial da Rocscience, Slide2, apto para análises de estabilidade em duas dimensões.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

A barragem objeto de estudo deste trabalho é a Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS. A barragem Santa Bárbara encontra-se no município de Pelotas, no estado do Rio Grande do Sul, distando 261 km da capital Porto Alegre. A mesma está em torno das coordenadas: Lat. 31°43'48,76" S e Long. 52°22'11,07". A barragem Santa Bárbara possui uma altura de 10 m, sendo que a cota de crista é de 12,00 m. O volume máximo do reservatório é de 9.975.000 m³. A crista da barragem possui um comprimento de 700 m e 5 m de largura, além de possuir revestimento asfáltico. Os taludes possuem declividade de 1V:2,5H em jusante e 1V:3H em montante.

A barragem Santa Bárbara é uma barragem de terra homogênea e compactada e tem como finalidade fornecer água bruta por gravidade para a planta de tratamento da ETA Santa Bárbara através de bombeamento, bem como para usos industriais, pelo barramento do Arroio Santa Bárbara, o principal afluente à represa, inserido na subbacia Atlântico Sudoeste, Jaguarão e Lagoa Mirim no Brasil e outros (Sousa Júnior, 2024). A seção tipo e vista superior da barragem está representada na figura 1.

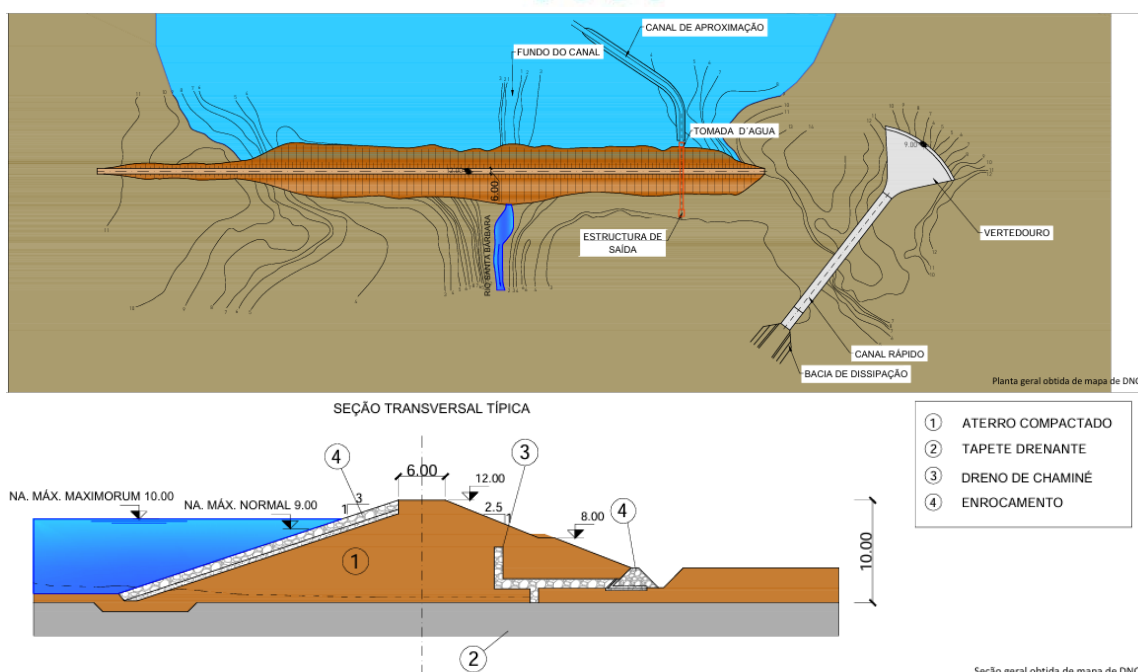


Figura 1. Vista superior e seção tipo do Barramento da Barragem Santa Bárbara (Fonte: Sousa Júnior, 2024)

Em 2024, o órgão responsável pela Barragem, o Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP), contratou uma empresa especializada para a elaboração do Plano de Segurança de Barragens, exigência da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa empresa realizou análises determinísticas de estabilidade, ensaios de caracterização e sondagens para a determinação das propriedades da barragem. Os ensaios de resistência e caracterização que serviram como inventário para as análises de estabilidade são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Inventário de dados dos materiais coletados no Relatório de Segurança de Barragens.

Componente	Material	$\gamma(kN/m^3)$	$c'(kPa)$	$\varphi'(^{\circ})$
Barramento	Amostra 01	20,8	13,7	29,7
	Amostra 02	20,7	4,3	29,6
	Amostra 03	20,1	9,0	25,7
	Amostra 04	20,8	5,7	35,4
Fundação	Amostra 01	20,5	7,5	30,0
	Amostra 02	21,4	3,0	32,1
	Amostra 03	19,4	4,0	29,4
	Amostra 04	19,1	0,2	34,7
Filtro + Dreno	Areia	19,0	0,0	33,0
	Brita 0	22,0	0,0	35,0
	Brita 1	22,0	0,0	35,0
	Dreno de pé	21,0	0,0	35,0
Rip – Rap	Rev. Externo	21,0	0,0	35,0
	Brita 1	22,0	0,0	35,0
	Brita 0	22,0	0,0	35,0
	Areia	19,0	0,0	33,0

2.1 Métodos

Com base no Relatório de Segurança, o presente trabalho pretende expandir as análises de estabilidade para as análises probabilísticas, conforme o esquema apresentado na figura 2. Na etapa de simulação computacional, foi utilizado o programa Slide2, do pacote da Rocscience. Com ele foram realizadas as análises de estabilidade do talude de jusante da barragem por meio de simulações determinísticas pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Além disso, foram realizadas as análises probabilísticas de estabilidade pelo Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), o Método de Pimento Método das Estimativas Pontuais (PEM), e o Método de Simulações de Monte Carlo (MSMC), considerando as 5 diferentes metodologias determinísticas. Foram considerados dois cenários:

análises com correlação entre variáveis e sem correlação entre as variáveis ângulo de atrito e coesão para ambos os materiais, do barramento e da fundação.

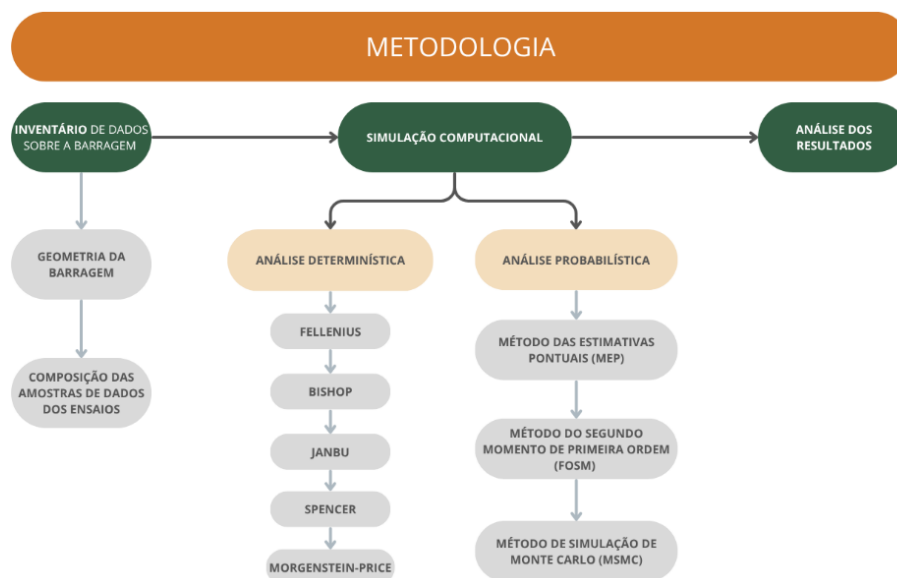


Figura 2. Fluxograma da Metodologia do Trabalho

As análises probabilísticas foram realizadas considerando sete variáveis: peso específico, coesão e ângulo de atrito do barramento; peso específico, coesão e ângulo de atrito da fundação; e, nível de água do reservatório. Os valores característicos estatísticos para os materiais do barramento e da fundação levaram em conta a base amostral de 4 amostras para cada material, conforme apresentado na Tabela 2. Com base na linha piezométrica produzida no relatório, determinou-se os níveis médio e máximo do nível de água, sendo o nível mínimo calculado automaticamente pelo software, desenhado mantendo-se a equidistância entre o nível médio e o nível máximo para a distância entre o nível mínimo e o nível médio. Calculou-se a variância deste considerando os limites distando 3 desvios padrão entre si, conforme distribuição normal. Adotou-se ângulo de atrito de 50° para os materiais do rip-rap e do dreno de pé afim de evitar superfícies críticas superficiais nessas estruturas.

Tabela 2. Estatísticas das variáveis aplicadas

Parâmetro		\bar{X}	$\sigma[X]$	$V[X]$	$COV[X]$	Distribuição
Variáveis	γ_{bar}	20,600	0,337	0,113	1,63%	Normal
	c'_{bar}	8,175	4,177	17,449	51,10%	Normal
	φ'_{bar}	30,100	3,994	15,953	13,27%	Normal
	γ_{fun}	20,100	1,055	1,113	5,25%	Normal
	c'_{fun}	3,675	3,015	9,089	82,04%	Normal
	φ'_{fun}	31,550	2,398	5,750	7,60%	Normal
	N. A.	NAméd	1,087	1,181	-	Normal
Correlação					$\rho_{c'_{bar}x\varphi'_{bar}}$	-0,340
					$\rho_{c'_{fun}x\varphi'_{fun}}$	-0,827

Ressalta-se que, os resultados do Coeficiente de Variação (COV) para cada uma das variáveis, assim como os Coeficientes de Correlação (ρ) para os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb, coesão e ângulo de atrito, foram calculados conforme as formulações consagradas da Estatística e foram comparados com os valores apresentados na literatura, como os presentes no trabalho de Kayser e Gajan (2014), Lacasse e Nadim (1996) e Duncam (2000). Para mais, em virtude do número limitado de amostras, adotou-se uma função de distribuição de probabilidade (FDP) normal para todas as variáveis de entrada e para a variável de saída, a

saber o fator de segurança, prática adequada para a representação do comportamento estatístico destes parâmetros, conforme descrito pelo USACE (2006). Eliminou-se os valores negativos para todas as variáveis, por não representarem a realidade.

Com relação ao número de simulações para cada um dos três métodos probabilísticos, determinou-se o número N de análises necessárias para cada método e para cada correlação, com base no número n de variáveis:

- FOSM: são necessárias $N = 2n + 1$ análises, totalizando $N = 15$;
- PEM: são necessárias $N = 2^n$ simulações, totalizando $N = 128$;
- MSMC: utilizou-se a fórmula abaixo,

$$N = \left(\frac{h_{a/2}^2}{4 \cdot \epsilon^2} \right) n \quad (i)$$

Onde:

$h_{a/2}$: Coeficientes de confiança para a distribuição normal e nível de confiança, conforme Harr (1987);

ϵ : é o máximo erro permitido, expresso em forma decimal;

n : número de variáveis;

Neste caso, para níveis de confiança de 95%, 90% e 80%, o número de simulações, respectivamente, seria de $1,23 \cdot 10^{18}$, $6,21 \cdot 10^{12}$ e $3,45 \cdot 10^9$. Esse número de simulações exige grande esforço computacional, podendo levar de dias a semanas para a sua conclusão. Dado que uma boa convergência é atingida com um número menor de simulações, optou-se por adotar 32.000 simulações, atingindo uma convergência da probabilidade de falha aceitável.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados típicos da superfície de ruptura são apresentados na Figura 3, que mostra o caso da análise probabilística de Monte-Carlo com correlação para o método de Morgenstern-Price. Nela é possível extrair informações como o fator de segurança médio (\bar{FS}), a probabilidade de falha (p_f) e o índice de confiabilidade (β) para uma distribuição normal e para uma distribuição lognormal. Na figura 3 também é possível observar a variação do nível de água, com os limites mínimo, médio e máximo.

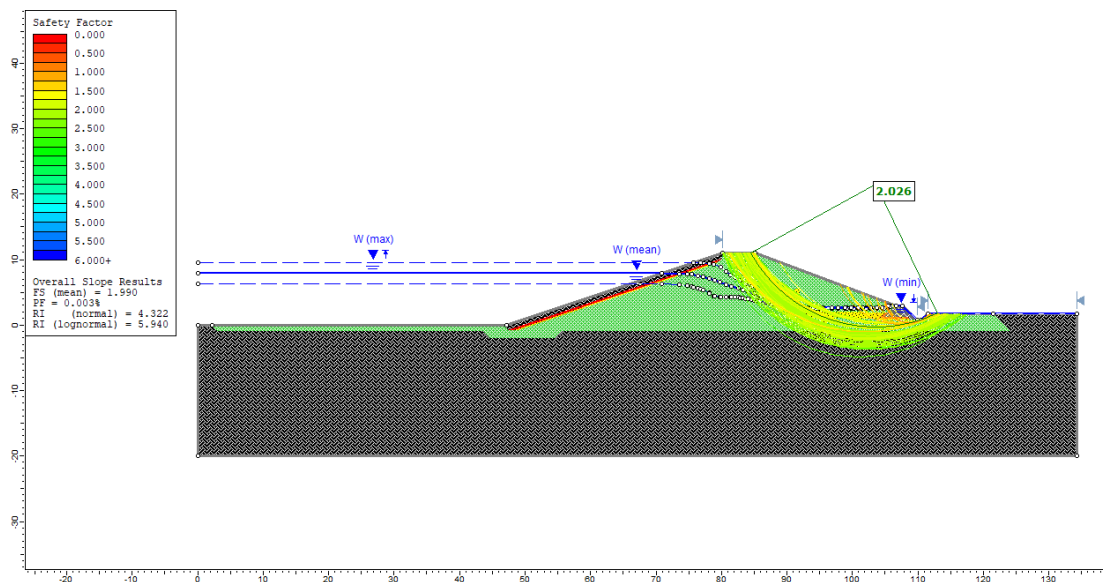


Figura 3. Superfície de Ruptura Probabilística – MSMC com correlação – Morgenstern-Price

Além do gráfico com a superfície de ruptura, extraiu-se o gráfico de convergência do fator de segurança para o MSMC com correlação para os 5 métodos: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Com base na Figura 4, nota-se que todos convergiram nas 32.000 simulações, apresentando um comportamento estável, com variação pequena entre os métodos.

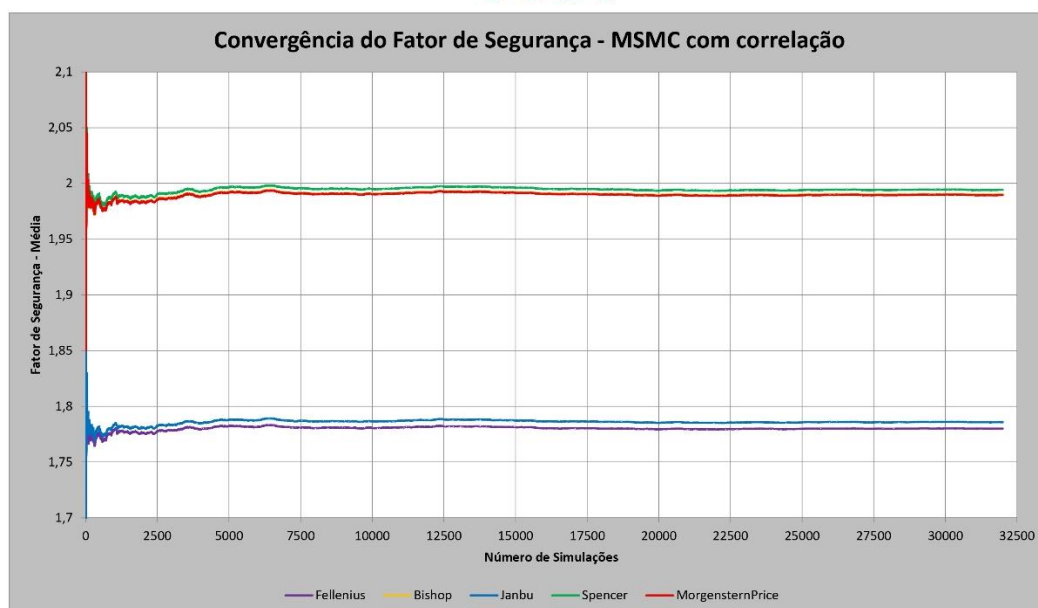


Figura 4. Convergência do Fator de Segurança Médio - MSMC com correlação – 5 métodos

Ademais, elaborou-se o gráfico de convergência da probabilidade de falha para o MSMC com correlação para os 5 métodos: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Analisando a Figura 5, nota-se que para as 32.000 houve uma estabilização aceitável, com pequenas variações. Para mais, nota-se que a tendência assintótica dos resultados, tendendo a reduzir cada vez o seu valor.

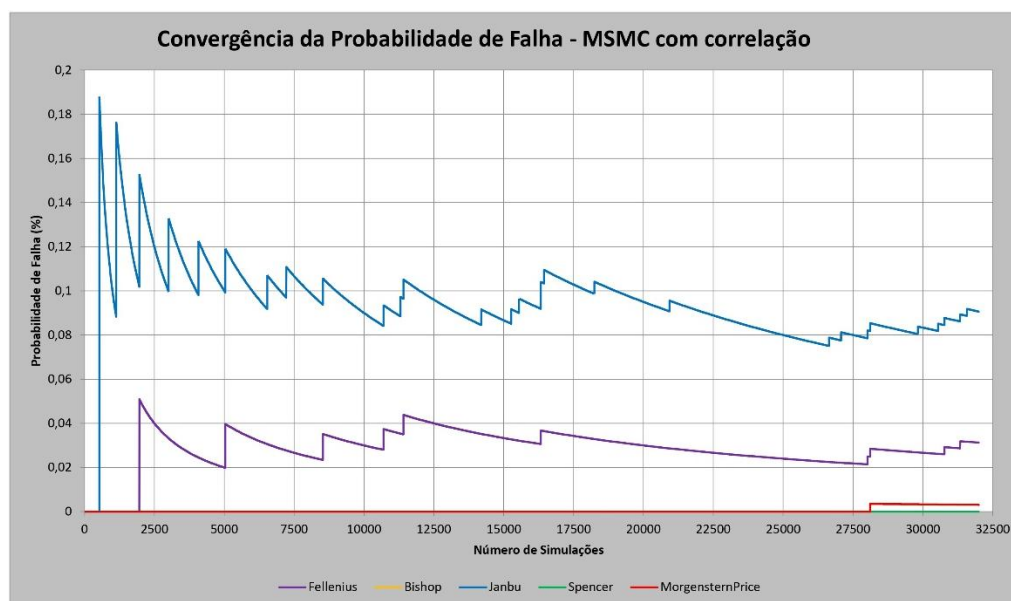


Figura 5. Convergência da Probabilidade de Falha - MSMC com correlação – 5 métodos

Por fim, apresenta-se o perfil típico de distribuição dos fatores de segurança para o Método de Simulação de Monte Carlo, com um exemplo do FS para o método de Morgenstern-Price, na figura 6. Este resultado corrobora a utilização da Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) Normal para a caracterização desta variável dependente.

Considerando-se esta FDP Normal para a descrição do fator de segurança, pode-se calcular o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha para os métodos FOSM e PEM. Com relação ao método MSMC, o software fornece esses parâmetros, calculados com base nas 32.000 simulações, portanto discreto. Assim, calcula-se os valores com base na FDP contínua. Os resultados são sintetizados na Tabela 3.

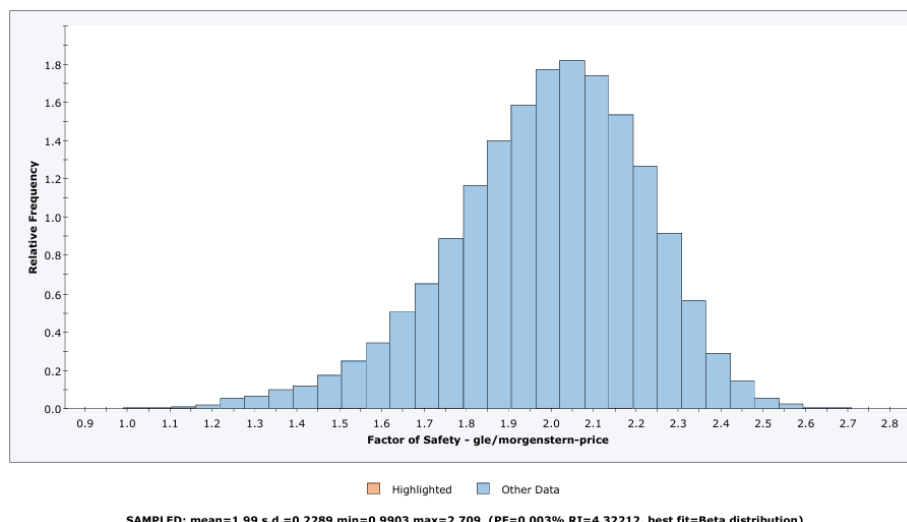


Figura 5. Histograma do Fator de Segurança - MSMC com correlação – Morgenstern-Price

Tabela 3. Resultado das análises determinísticas e probabilísticas

MÉTODO	Fellenius		Bishop		Janbu		Spencer		Morgenstern – price	
	s/correl.	c/correl.	s/correl.	c/correl.	s/correl.	c/correl.	s/correl.	c/correl.	s/correl.	c/correl.
DETERMINÍSTICO										
	1,829		2,027		1,826		2,029		2,026	
	1,829		2,027		1,826		2,029		2,026	
FOSM	FS	0,047	0,047	0,077	0,050	0,050	0,077	0,077	0,078	0,077
	β_{normal}	3,817	3,842	3,691	3,710	3,683	3,704	3,698	3,717	3,668
	$p_{f normal}$	6,76E-05	6,10E-05	1,11E-04	1,03E-04	1,15E-04	1,06E-04	1,09E-04	1,01E-04	1,22E-04
	$p_{f normal}$	0,007%	0,006%	0,011%	0,010%	0,012%	0,011%	0,010%	0,012%	0,011%
PEM	FS	1,746	1,770	1,971	1,978	1,765	1,776	1,976	1,970	1,976
	β_{normal}	0,048	0,025	0,062	0,041	0,046	0,030	0,062	0,041	0,064
	$p_{f normal}$	3,414	4,852	3,917	4,841	3,577	4,502	3,930	4,852	3,835
	$p_{f normal}$	3,20E-04	6,12E-07	4,48E-05	6,46E-07	1,74E-04	3,37E-06	4,25E-05	6,12E-07	6,27E-05
MSMC	FS	1,768	1,780	1,985	1,990	1,778	1,786	1,988	1,994	1,984
	β_{normal}	0,050	0,036	0,071	0,053	0,055	0,040	0,071	0,052	0,071
	$p_{f normal}$	3,432	4,104	3,691	4,303	3,325	3,951	3,717	4,367	3,688
	$p_{f normal}$	2,99E-04	2,03E-05	1,12E-04	8,42E-06	4,41E-04	3,89E-05	1,01E-04	6,30E-06	1,13E-04
	0,030%	0,002%	0,011%	0,001%	0,044%	0,004%	0,010%	0,001%	0,011%	0,001%

Com base nos resultados apresentados, nota-se que em todos os cenários e métodos propostos, a barragem apresenta um nível de performance bom a a alto, atendendo ao índice de confiabilidade e probabilidade de falha exigidos para barragens, conforme classificações e exigências da USACE (2006). Quanto à legislação brasileira de barragens, sobretudo a NBR 13026 (ABNT, 2024), são atendidos os fatores de segurança mínimos, de 1,5. Nota-se também a tendência à diminuição do risco e aumento da confiabilidade quando da consideração da correlação entre os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb para o material do barramento e da fundação.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que a Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS atende os requisitos internacionais quanto ao seu nível de desempenho e a probabilidade de falha e índice de confiabilidade, quando analisado sob diferentes abordagens probabilísticas, considerando diferentes métodos de equilíbrio limite, para a estabilidade do talude de jusante considerando sete variáveis, dentre elas o nível de água podendo atingir o nível de cheia. Além disso, a barragem atendeu as normativas nacionais quanto aos fatores de segurança exigidos para a barragem. Entretanto, a legislação nacional carece de exigências para os parâmetros da análise de confiabilidade, o que ressalta seu atraso quando comparado aos países desenvolvidos e avançados nas análises geotécnicas que levam em consideração a variabilidade dos parâmetros. Notou-se também um decréscimo do fator de segurança nas análises probabilísticas quando comparados às análises determinísticas. Por fim, conclui-se que os métodos probabilísticos simplificados, a saber o FOSM e PEM superestimaram a probabilidade de ruptura, resultado em valores consideravelmente menores que os obtidos nas análises MSMC. Alerta-se que este trabalho não considerou a situação de deterioração das estruturas da barragem, nem analisou outras anomalias



que podem levar a barragem à ruína, por diferentes mecanismos de ruptura como o piping, as infiltrações, e a erosão do maciço, limitando-se às análises da geometria de projeto com os parâmetros atuais de resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 13028:2024: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2024.
- Agência Nacional de Águas – ANA. *Relatório de Segurança de Barragens 2018: ano base 2017*. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-de-barragens/relatorio-de-seguranca-de-barragens/relatorios-publicados/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2018.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- Association of State Dam Safety Officials - ASDSO. *Living With Dams: Extreme Rainfall Events*. [S. l.], 2015. Disponível em: <https://damsafety.org/content/living-dams-extreme-rainfall-events>. Acesso em: 05 mai. 2025.
- Cardoso, I. P., Siqueira, T. M., Timm, L. C., Rodrigues, A. A., Nunes, A. B. Analysis of average annual temperatures and rainfall in southern region of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 57, n. 1, p. 58-71, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781204>.
- Duncan, J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126(4): 307- 316, 2000.
- 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: IJDRR*, v. 31, p. 806–831, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.07.024>.
- Harr, M. E. *Reliability-Based Design in Civil Engineering*. Mc Graw-Hill, Inc, EUA. 1987.
- Kayser, M.; Gajan, S. Application of probabilistic methods to characterize soil variability and their effects on bearing capacity and settlement of shallow foundations: state of the art. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Taylor & Francis, v. 8, n. 4, p. 352–364, 2014.
- Lacasse, S.; Nadim, F. *Uncertainties in Characterizing Soil Properties, Proceedings, Uncertainty in the Geologic Environment: from Theory to Practice*, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, Vol. 1, pp. 49-75, 1996.
- Queiroga, A.A.; Luz, M.B.; Filgueira, HJ. A., A redução de riscos de desastres (RRD) e a resiliência na segurança alimentar e nutricional. *Territorium*, v. 29, n. 1, p. 139-148, 2022. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_29-1_12.
- Raman, A.; LIU, Fei. *An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation*. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.05219>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- Rossi, C. L. C. U., Marques, M. G., Teixeira, E. D., Melo, J. F. De M., Ferla, R., Prá, M. D. Dam-break analysis: proposal of a simplified approach. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, e66, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200066>. Acesso em: 11 mar. 2025
- Silva, T. F. da. *Monitoramento da integridade e estabilidade de uma barragem de terra através de métodos geofísicos*. 2024. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2024.
- Sousa Júnior, R. P. de. *Plano de Segurança de Barragens da Barragem Santa Bárbara – Pelotas/RS*. Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP). Pelotas, 2024.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). ETL 1110-2-561: Engineering and design: Reliability analysis and risk assessment for seepage and slope stability failure modes for embankment dams. Washington- DC, 2006. 128 p.