

Avaliação Da Probabilidade De Ruptura Nao Drenada De Uma Barragem Com Fundação Em Aluviao

Ana Luiza Mendes Halabi

Engenheira Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, ana.halabi@lme.pcc.usp.br

André Teólifo Beck

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, atbeck@sc.usp.br

Adrian Torrico Siacara

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

RESUMO: A utilização de técnicas baseadas em análises probabilísticas é uma maneira de lidar com as incertezas intrínsecas na avaliação de segurança de barragens. Uma barragem pode ter diferentes tipos de falhas devido a eventos extremos, como terremotos, enchentes, movimentos de massas, dentro outros. Um tipo de falha comum em uma barragem é a falha por problemas na fundação. Barragens construídas em leitos de rio, com presença de aluviões arenosos e argilosos com potencial de liquefação, fazem parte da realidade da geotecnia brasileira. Assim, este trabalho estuda uma metodologia de análise de probabilidade de liquefação de uma barragem com fundação em aluvião arenoso fofo, e saturado, e avalia a probabilidade de falha para solicitações drenadas, não drenadas e sísmicas. Adicionalmente foi realizada uma comparação da probabilidade de falha Expansão de Caos Polinomial (PCE) comparada com método de simulação de Monte Carlo (SMC), concluindo que ambos os métodos são válidos para a geometria. A partir desses resultados, foi desenvolvida a árvore de eventos simplificada para uma ruptura de talude de jusante da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação de Monte Carlo; Risco; Análise Probabilística; Liquefação.

ABSTRACT: The use of techniques based on probabilistic analysis is a way of dealing with the intrinsic uncertainties in dam safety assessment. A dam can have different types of failures due to extreme events, such as earthquakes, floods, mass movements, among others. A common type of dam failure is failure due to foundation problems. Dams built on riverbeds, with the presence of sandy and clayey alluvium with liquefaction potential, are part of the reality of Brazilian geotechnical engineering. Thus, this work studies a methodology for analyzing the probability of liquefaction of a dam with a foundation in soft and saturated sandy alluvium, and evaluates the probability of failure for drained, undrained and seismic stresses. Additionally, a comparison was made of the failure probability Polynomial Chaos Expansion (PCE) compared with the Monte Carlo simulation method (SMC), concluding that both methods are valid for the geometry. From these results, the simplified event tree was developed for a slope failure downstream of the dam.

KEYWORDS: Monte Carlo Simulation; Risk; Probabilistic Analysis; Liquefaction.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas baseadas em riscos é uma maneira de lidar com as incertezas intrínsecas na avaliação de segurança de barragens (Hartford and Baecher 2004, Caldeira 2005). Uma barragem também pode falhar devido a eventos extremos, como terremotos, enchentes, movimentos de massas, dentro outros (RIBAS, et al. 2021). Quando esses eventos ocorrem, a estrutura pode colapsar ou permanecer intacta, a depender do seu grau de segurança atual. A estrutura pode sofrer diminuição de sua segurança a partir de diferentes eventos, a seguir: (a) eventos extremos; (b) falhas de projetos; (c) erros ou más práticas de engenharia e investigações insuficientes durante construção e enchimento do reservatório; e (d) falha de inspeção, monitoramento e manutenção (Donnelly and Acharya, 2020).

Assim, para a operação segura de barragens de terra é necessário o estudo dos modos de falha da estrutura, incluindo as principais causas, seus possíveis efeitos, e maneiras de identificação e prevenção (Ribas,

at al. 2021). A análise de árvore de eventos (ETA) é uma metodologia bastante difundida que auxilia na avaliação de probabilidades de ruptura de uma estrutura a partir de análises quantitativas e semiquantitativas (Beck, 2012).

Para o estudo de uma barragem, as falhas na fundação são o sexto tipo de ruptura mais comum, e correspondem a cerca de 6 % dos acidentes históricos de rupturas de barragem de rejeitos na literatura (Halabi et al., 2022). Barragens construídas em leitos de rio, com presença de aluviões arenosos e argilosos com potencial de liquefação, fazem parte da realidade da geotecnia brasileira, em especial em barragens de menor altura. Assim, este trabalho estuda a probabilidade de ruptura de uma barragem com fundação em aluvião arenoso fofo, e saturado, e com potencial de liquefação, para solicitações sísmicas de uma barragem com fundação em aluvião arenosa fofo e saturada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma análise de estabilidade determina de forma quantitativa um valor para avaliação do comportamento e da sensibilidade à ruptura de uma barragem, nas condições em que estão submetidas (poropressões, sobrecargas, geometria, etc).

2.1 Equação de estado limite

O enfoque determinístico consiste em selecionar valores adequados para variáveis e calcular os fatores de segurança correspondentes às condições de solicitação (Barobosa, 2023). O Fator de Segurança é igual à relação entre as forças solicitantes e resistentes, sendo que estas se igualam a um no equilíbrio. A função de performance $g(\mathbf{X})$ é definida a partir do Fator de Segurança conforme a Equação 1 (Phoon, 2008), de forma que $g(\mathbf{X}) = 0$ é o limite entre a falha e a segurança de uma estrutura geotécnica.

$$g(\mathbf{X}) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = FS(x_1, x_2, \dots, x_n) - 1 \quad (1)$$

2.2 Métodos probabilísticos

Problemas de confiabilidade estrutural são formulados em termos de um vetor de variáveis aleatórias, $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, representando um conjunto de parâmetros geotécnicos. A probabilidade de ruptura, então, se dá a partir da Equação 2, onde $f_x(\mathbf{x})$ representa a função probabilidade de densidade de \mathbf{x} .

$$P_f = P[g(\mathbf{X}) \leq 0] = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

A simulação de Monte Carlo é o nome dado a simulações numéricas envolvendo a utilização de números aleatórios. Na análise de estabilidade, esta consiste no teste de uma estrutura para todas as combinações possíveis de resistências e ações. Estes métodos são também denominados métodos exatos, pois tendem ao resultado exato quando o número de simulações tende ao infinito (Beck, 2012). Porém, tem um grande custo computacional. Diversas técnicas de amostragem podem ser utilizadas para otimizar esse método e, assim, diminuir seu custo computacional e acelerar a convergência.

A técnica de amostragem do Hipercubo Latino fornece resultados baseia-se em amostragem “estratificada” com seleção aleatória dentro de cada estrato, resultando em uma amostragem mais suave das distribuições de probabilidade (ROCSCIENCE, 2024).

Para aproximar a resposta de um modelo computacional mais complexo, podem ser aplicadas representações analíticas de forma a se criar um modelo simplificado, meta-modelo (Beck, 2012). Dentre as técnicas de meta-modelagem, destacam-se a expansão de polinômios de caos (Hermite de terceira ordem) (Choi, S.K. et al., 2004).

Mais informações sobre metodologias de análises probabilísticas são encontradas em Beck (2012).

2.3 Arvore de eventos

A árvore de eventos inclui uma ilustração dos possíveis resultados de um sistema, que parte de um evento inicial e se ramifica a cada evento e que é capaz de modelar o mecanismo de falha de um sistema desde o começo da falha e assim pode ser aplicado para a confiabilidade de estruturas (Goodarzi et al 2015). A sua estrutura começa com a probabilidade de um evento inicial (como evento de chuva ou sismo) no lado esquerdo, e a árvore se divide em galhos a direita à medida que eventos condicionantes da continuidade da falha se apresentam, até que os galhos finais são o resultado final da ruptura.

A probabilidade condicional em uma árvore de eventos representa a probabilidade que ocorra um evento, representado por um galho, dadas as séries de eventos precedentes únicos que ocorreram (Hill et al. 2001). Assim, uma série de eventos é definida como um caminho, único para cada galho, e a probabilidade final deste evento ocorrer é igual ao produto da probabilidade do evento inicial e da probabilidade condicional de todos os eventos anteriores. A árvore pode ser estendida para representar as consequências de cada ramo.

A avaliação de probabilidade condicional por árvore de eventos tem limitações, uma vez que em geral são necessários julgamentos subjetivos Goodarzi et al (2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a definição de uma probabilidade condicional de ruptura de uma barragem com fundação em sedimentos com potencial de liquefação, foram realizadas análises de estabilidade determinística drenada, não drenada e sísmica. A árvore de eventos apresentada neste trabalho corresponde somente à análise de ruptura por instabilidade do talude de jusante da barragem.

A barragem utilizada neste estudo é uma barragem de contenção de água, com 30 m de altura, com bermas 1V:3H de 10m, com 5m entre bermas. A barragem apresenta uma berma de estabilização em enrocamento, de 5,5 m de altura e 60 m de comprimento, com talude de 1V:2,5H. A fundação foi estimada como 28 m de areia fofa, saturada, com potencial de liquefação.

Neste estudo, os parâmetros de resistência de coesão efetiva, ângulo de atrito e peso específico dos materiais foram estimados conforme comportamento típico dos materiais. Para as análises probabilísticas, foram avaliados somente os parâmetros de resistência do corpo de aterro da barragem (coesão c' , ângulo de atrito ϕ' e peso específico natural γ) e da fundação (coesão, ângulo de atrito e resistência não drenada $Su/\sigma'v$), por serem os materiais mais influentes da resistência da estrutura.

A distribuição estatística dos dados foram definidas como distribuição normal, com desvio padrão da coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ) estimados conforme valores típicos de coeficiente de variação (CoV) apresentados em Silva (2015). A partir dos coeficientes de variação típicos, foram definidos o desvio padrão (σ). Para a razão de resistência não drenada, considerou-se como valor típico de variabilidade de um material homogêneo como sendo igual a 0,04, conforme o erro padrão apresentado por Olson e Stark (2003) o equivalente a um Coeficiente de Variação de 15%. O resumo dos parâmetros dos materiais da barragem são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de resistência dos materiais.

Material	Cor	γ (kN/m ³)	Parâmetro de Resistência				
			Parâmetro	Unidade	Média	CoV (%)	σ
Aterro argiloso		18	ϕ'	(°)	30	10	6
			c'	(kPa)	15	40	6
Enrocamento		22	ϕ'	(°)	38	-	-
Dreno		22	ϕ'	(°)	35	-	-
Areia contrátil - drenada		20	ϕ'	(°)	30	-	-
Areia contrátil - não drenada		20	$Su/\sigma'v$	(kPa)	0,27	15	0,04

Para as análises de estabilidade, foram realizadas análises de estabilidade por equilíbrio limite para determinação de um fator de segurança superior não drenado superiores à Resolução nº 95 da ANM, temos que o $FS=1,5$ na condição drenada, $FS=1,5$ na condição não drenada e $FS=1,1$ na condição não-drenada pseudo

estática). A Figura 1 apresenta a geometria da barragem com os fatores de segurança determinísticos encontrados para cada caso estudado.

A barragem apresenta fatores de segurança drenado muito superior ao 1,5 preconizado por norma, com ruptura pelo maciço. Porém, e situação não drenada (drenada ou sísmica) os fatores de segurança são mais próximos dos preconizados, e com ruptura passando pela fundação com liquefação.

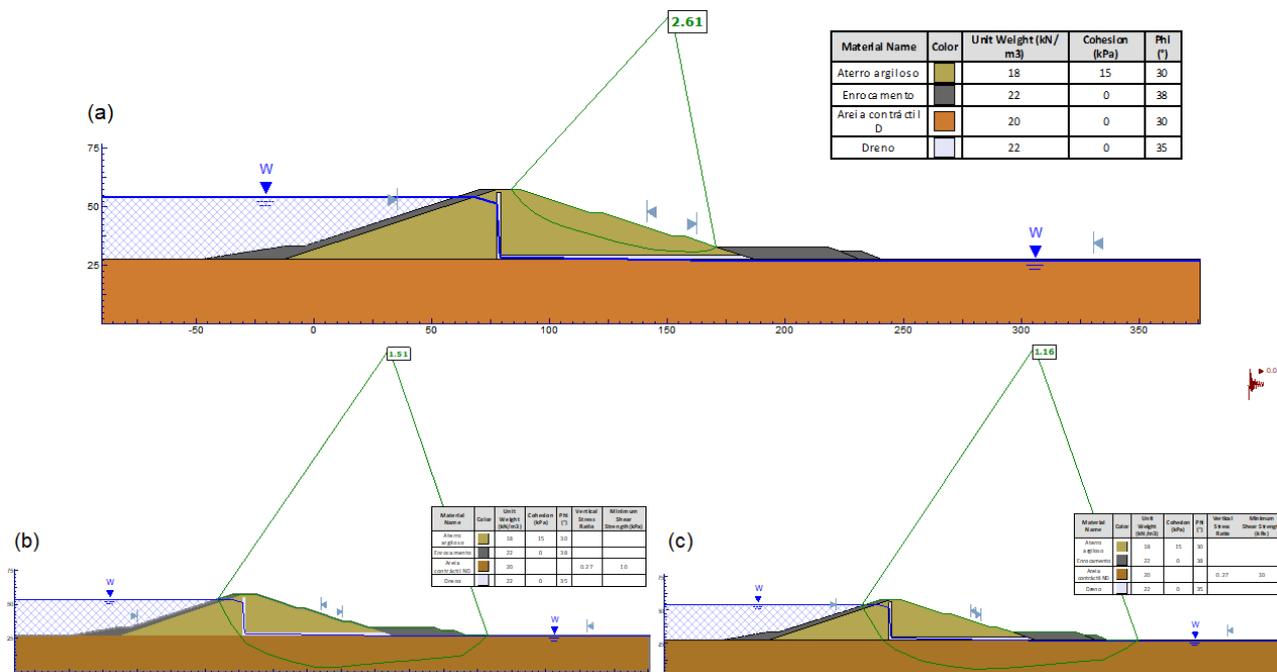


Figura 1. Geometria da barragem com Fatores de Segurança na condição (a) drenada – $FS = 2,61$; (b) não drenada – $FS = 1,51$; e (c) não drenado pseudo-estático – $FS=1,16$.

Em seguida foi realizada uma análise probabilística na barragem, com a determinação da superfície crítica probabilística. Primeiramente, as análises foram realizadas utilizando o método de simulação Monte Carlo com amostragem LHS, para determinar a probabilidade de ruptura por carregamento drenado, não drenado e sísmico.

As análises probabilísticas foram realizadas também pelo método de PCE, a fim de avaliar se este método simplificado apresenta convergência satisfatória para este problema. Este método substitui o modelo original, com alta demanda computacional, por uma superfície de resposta polinomial (Beck, 2012), diminuindo o tempo comportamental. Porém, deve-se atentar se o polinômio calculado é representativo para o problema estudado, sendo portanto importante sua verificação com métodos de simulação.

A partir desses resultados, construída a árvore de eventos simplificada para uma ruptura por talude de jusante dessa barragem. Para isso, estimou-se a probabilidade de evento que cause o comportamento não drenado da fundação com susceptibilidade a liquefação e a probabilidade de ocorrência de evento sísmico.

O evento sísmico crítico utilizado foi avaliado de duas maneiras, a título de comparação. A primeira, utilizou-se o sismo de “projeto”, que equivale a um $FS > 1,10$, e avaliou-se a probabilidade de ruptura dessa análise condicionada pela probabilidade do sismo de projeto. Além disso, definiu-se um sismo ky crítico ($FS=1,0$) pelo software computacional, e estimou-se a probabilidade aproximada de ocorrência deste sismo. Para a probabilidade de ruptura sísmica da árvore de eventos, foi utilizado o pior caso entre os dois.

Para análise sísmica foi realizada análise pseudo-estática com tempo de 2500 anos. O PGA foi definido a partir de um mapa sísmico do quadrilátero ferrífero próximo a cidade de Bonfim, local em que se observa um PGA de 0,09 g. Pelo método de Hynes-Griffin (1984) este corresponderia a uma aceleração de 0,045 na direção horizontal. Outros métodos, como o de Papadimitriou (2014) e Bray e Macedo (2019) definem a aceleração horizontal para análises pseudo-estáticas, mas não foram aplicados pela simplicidade do modelo proposto.

Destaca-se que a utilização de análises pseudo-estáticas não é apropriado para a verificação sísmica de materiais com potencial de liquefação, sendo necessária a verificação dinâmica destas estruturas. Esta foi utilizada, porém, por simplificação do modelo e pela maior facilidade de realização de análises probabilísticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados da análise probabilísticas da barragem com fundação de sedimentos com potencial de liquefação idealizada. As Figuras 2 e 3 apresentam as análises probabilísticas para condições drenada, não drenada e pseudo-estática não-drenada pelos método de LHS e *Response Surface*, respectivamente. As análises foram feitas por *Overall Slope*, e as seções probabilísticas mais críticas são apresentadas nas figuras. A partir dos resultados, notamos que, no problema verificado, o método de *Response Surface* apresentou resultados similares à simulação por hiperbólico latino, sendo uma boa maneira para diminuição do tempo de resposta no caso da barragem apresentada.

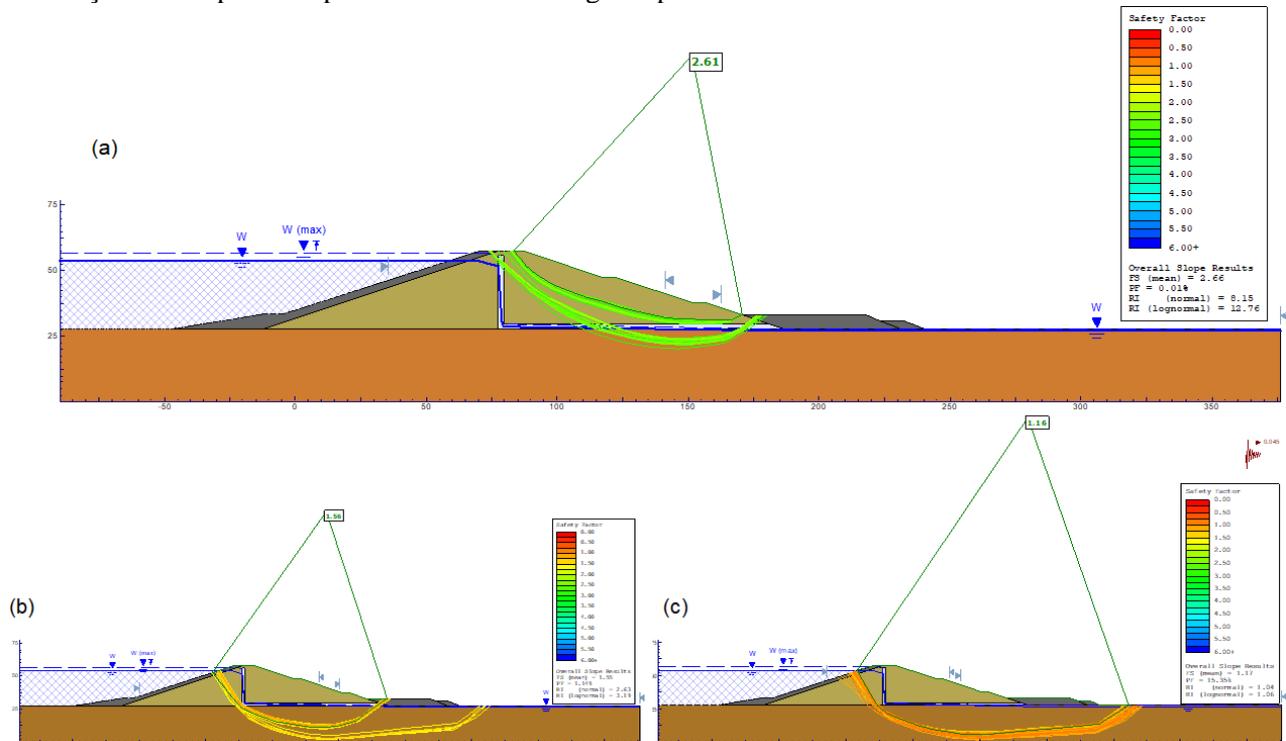


Figura 2. Análises probabilística da barragem por LHS e *Overall Slope* (a) drenado – $FS_{\text{médio}} = 2,61$; (b) não drenado – $FS_{\text{médio}} = 1,51$; e (c) não drenado pseudo-estático – $FS_{\text{médio}} = 1,16$.

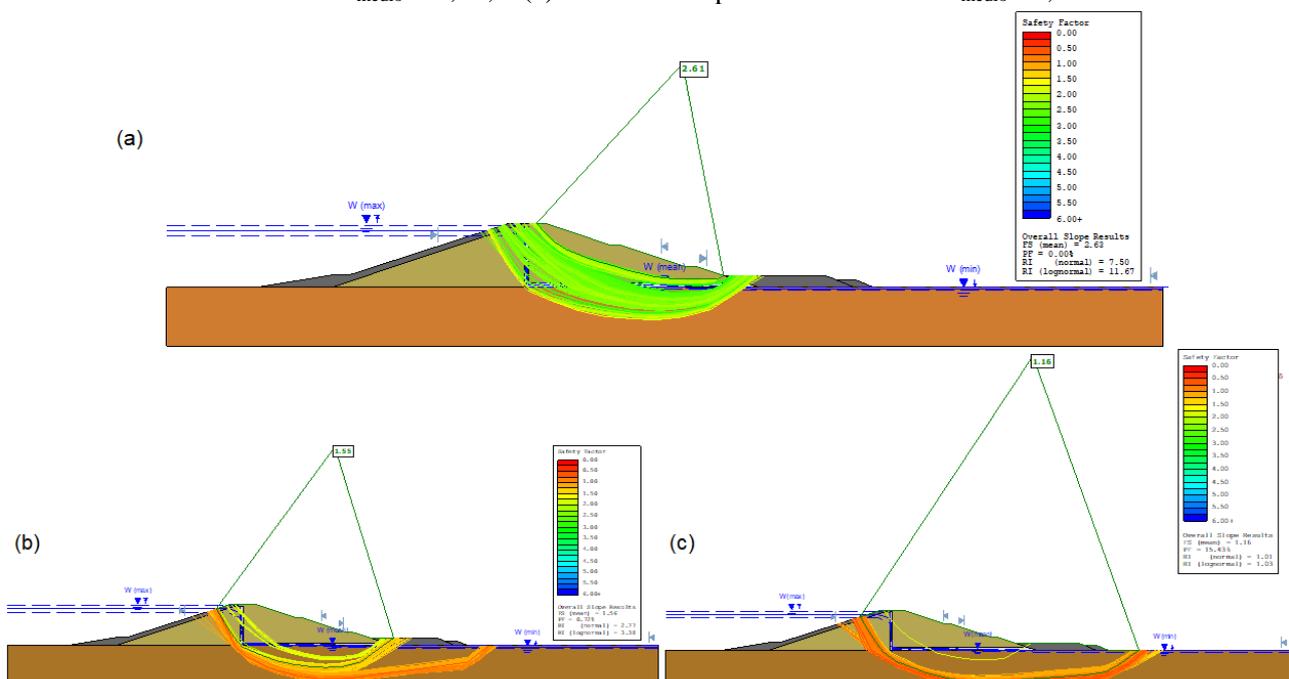


Figura 3. Análises probabilística da barragem por *Response Surface* e *Overall Slope* (a) drenado – $FS_{\text{médio}} = 2,61$; (b) não drenado – $FS_{\text{médio}} = 1,51$; e (c) não drenado pseudo-estático – $FS_{\text{médio}} = 1,16$.

A Tabela 3 apresenta os fatores de segurança da análise determinística, o fator de segurança médio (FoS) da análise probabilística por LHS e por *Response Surface*, e as probabilidades de ruptura para as análises drenada, não drenada, e não drenada pseudo-estática. Os fatores de segurança médios são próximos aos obtidos nas análises determinísticas, dada a distribuição normal das variáveis de entrada.

Tabela 3. Resumo dos resultados determinísticos e probabilísticos.

Método de Análise	Parâmetro	Condição		
		Drenada	Não Drenada	Pseudo-estática
Determinística		2,61	1,51	1,16
<i>Response Surface</i>	Média	2,62	1,55	1,17
	Desvio Padrão	0,22	0,22	0,16
	Probabilidade de Ruptura	1,0E-05	1,6E-02	1,6E-01
LHS	Média	2,63	1,56	1,16E+00
	Desvio Padrão	0,22	0,20	0,16
	Probabilidade de Ruptura	1,0E-05	1,6E-02	1,5E-01

A partir desses resultados, foi desenvolvida a árvore de eventos simplificada para uma ruptura de talude de jusante da barragem, apresentada na Figura 4, para avaliar a sua segurança. A probabilidade de ocorrência de solicitação não drenada foi definida de maneira conservadora, porém tendo em vista se tratar de camada homogênea de areia, o que diminui as chances de gatilho sísmico.

A probabilidade de ruptura estimada para o talude de jusante é igual a $3,3E-4$. A probabilidade de ruptura final da estrutura está intimamente relacionada à rupturas não drenadas, apesar de sua menor probabilidade de ocorrência durante a vida útil da estrutura, devido a alta probabilidade de ruptura não drenada e sísmica.

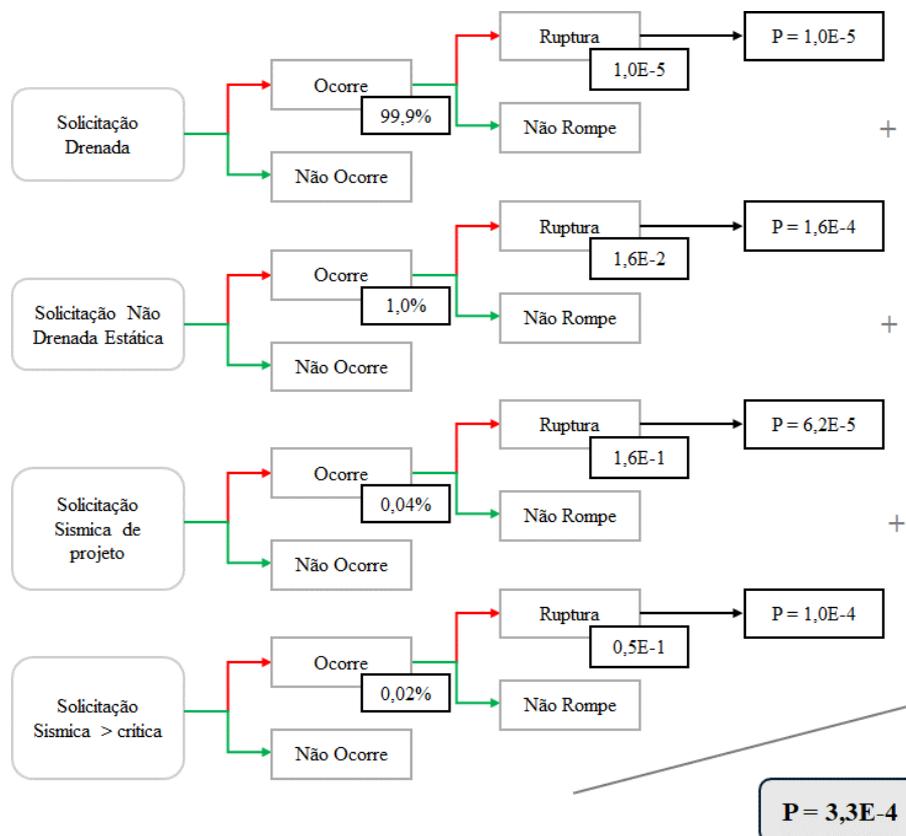


Figura 4. Árvore de eventos simplificada para uma ruptura de talude de jusante da barragem.

A probabilidade anual de ruptura da barragem obtida deve ser considerada em relação às consequências de ruptura, para cálculo dos riscos envolvidos e verificação se estes são aceitáveis. Assim, foi verificado o risco envolvido na ruptura desta barragem hipotética, para avaliação de sua aceitabilidade. Foram definidas duas situações de operação e locação da barragem, com potencial de perda de vidas humanas de 2 e 200 pessoas, para avaliar o risco da estrutura. A avaliação de risco foi realizada pelo gráfico F-N da FERC (2016), e é apresentada na Figura 5.

Observa-se que a probabilidade de ruptura apresentada encontra-se em uma categoria de riscos adequados desde que satisfeitas as condições de menores possíveis (ALARP) caso tenha uma perda de carga potencial de 2 pessoas. Caso essa barragem ponha em perigo mais pessoas, ela já se encontraria em uma condição de risco inaceitável.

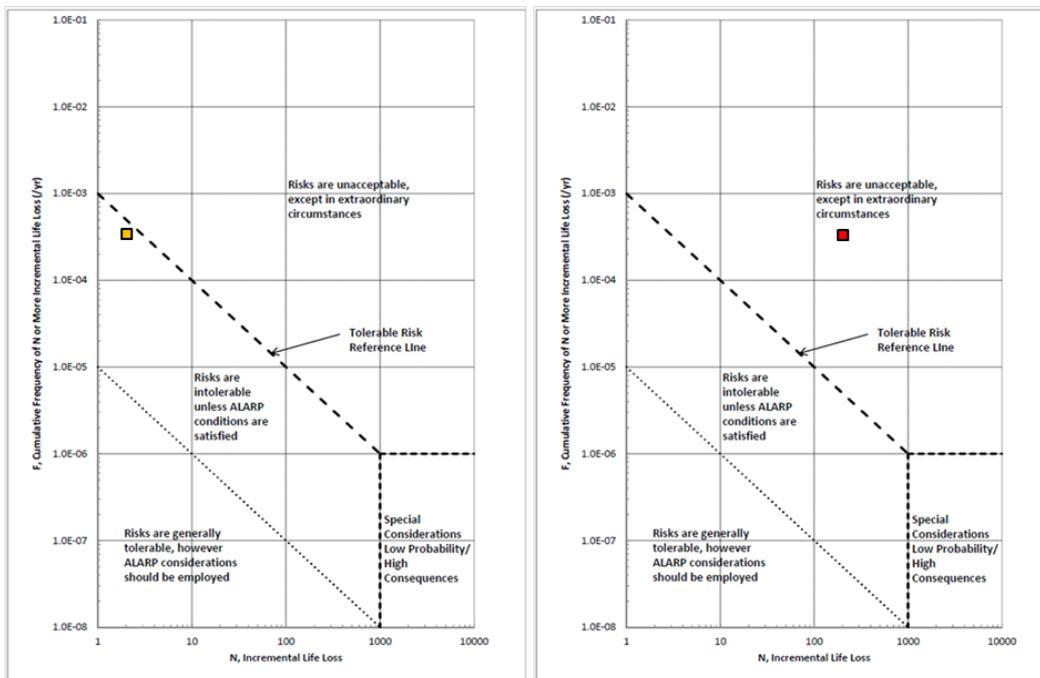


Figura 5. Árvore de eventos simplificada para uma ruptura de talude de jusante da barragem.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a probabilidade de ruptura de uma barragem de água com fundação com potencial de liquefação.

Este trabalho comparou a determinação de probabilidade de ruptura por *Response Surface* comparada com método de simulação com hiperbólico latino. Para a geometria utilizada, a superfície de resposta calculada por *Response Surface* foi capaz de encontrar de maneira rápida a probabilidade de ruptura da geometria, confirmada pelo método LHS, sendo uma boa maneira para diminuição do tempo de resposta no caso da barragem apresentada.

A partir desses resultados, foi desenvolvida a árvore de eventos simplificada para uma ruptura de talude de jusante da barragem. A probabilidade de ruptura estimada para o talude de jusante, a partir da árvore de eventos, é igual a $3,3E-4$. Este valor deve ser avaliado em conjunto com a avaliação de segurança dos outros sistemas da barragem, em conjunto com as consequências de uma ruptura hipotética da estrutura, para avaliação completa do risco da estrutura.

Análises de árvores de eventos são ferramentas úteis para a realização de análises de risco de barragens. A árvore de eventos apresentada apresenta estrutura simples porém que permite uma estimativa da probabilidade de ruptura do talude de jusante por instabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beck, André T. *Curso de confiabilidade estrutural*. São Carlos: Engenharia de Estruturas, EESC, USP, 2012.
- Bray, J. D., Macedo, J. (2019). “Shear-induced seismic slope displacement estimates for shallow crustal earthquakes”. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*.
- Choi, S. K., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., & Pettit, C. L. (2004). Polynomial chaos expansion with latin hypercube sampling for estimating response variability. *AIAA Journal*, 42(6), 1191-1198.
- Donnelly, C.R., Acharya, A.M. (2020). A discussion on the evolution and application of quantitative risk informed dam safety decision making. In: Mohd Sidek, L., Salih, G., Boosroh, M. (Eds.), *Water Resources Development and Management*. ICDSME 2019, Springer, Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-1971-0_52.
- Goodarzi, E., Lee, T., Ziaei, M., Haghizadeh, A. (2010). Estimating Probability of Failure Due to Internal Erosion with Event Tree Analysis. *EJGE Vol. 15 [2010], Bund J*, p. 935-948.
- Halabi, A. L. M., Torrico Siacara, A., Sakano, V. K., Pileggi, R. G., & Futai, M. M. (2022). Tailings dam failures: a historical analysis of the risk. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(2), 464–477. doi:10.1007/s11668-022-01355-3.
- Hartford, D.N. and Baecher, G.B., 2004. *Risk and uncertainty in dam safety*. London, UK: Thomas Telford Ltd.
- Hill, P.I., Bowles, D.S., Nathan, R.J., Herweynen, R. (2001). On the art of event tree modeling for portfolio risk analyses. *NZSOLD/ANCOLD 2001 Conference on Dams*, p. 1-10.
- Hynes-Griffin, M. E., Franklin, A. G. (1984). “Rationalizing the Seismic Coefficient Method,” *Miscellaneous Paper GL-84-13, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg*, 21 p.
- Olson, S.M. and Stark, T.D. (2003) Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 727-737. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(727\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727)).
- Papadimitriou, A., Bouckovalas, G., Andrianopoulos, K. (2014), “Methodology for estimating seismic coefficients for performance-based design of earthdams and tall embankments”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Phoon, K.-K. (2008). *Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications*. (K.-K. Phoon, Ed.) Routledge.
- Ribas, J.R., Severo, J.C.R., Guimarães, J.F., , K.P.C. (2021) A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil, *Energy Reports*, Volume 7, Pages 4412-4424, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.012>.
- Schafer, H.L.; Beier, N.A.; Macciotta, R. (2022). Applying a Generalized FMEA Framework to an Oil Sands Tailings Dam Closure Plan in Alberta, Canada. *Minerals*, 12, 293. <https://doi.org/10.3390/min12030293>.
- Silva, C. C. (2015) *Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 134 f.