

Avaliação Sísmica da Estabilidade de Barragens pela Metodologia de Bray e Macedo

Henrique Castelo Branco

Engenheiro Geotécnico, TRACTEBEL, Belo Horizonte, Brasil, henrique.castelo@tractebel.engie.com

RESUMO: A avaliação da estabilidade de barragens em condição de sismicidade se tornou cada vez mais crucial dado o significativo aumento de rupturas após terremotos. Diretrizes internacionais como o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (ICMM, 2020) abordam o risco sísmico como critério fundamental para o ciclo de vida das barragens. A aplicação de análises baseadas no método de Newmark (1965) formam a base para estudos preliminares da performance sísmica das estruturas geotécnicas (J. Bray e J. Macedo, 2017; J. Bray e J. Macedo, 2018). Apesar destas análises não substituírem as vantagens de uma análise dinâmica não linear, obter uma sensibilidade do deslocamento permanente induzido por sismo esperado antes de conduzir análises mais complexas é valioso (J. Bray e J. Macedo, 2019). O presente artigo discorre sobre a análise do estudo de risco sísmico, da definição dos critérios e tempo de retorno associados e da metodologia para calcular o coeficiente pseudoestático, adotando a proposta por J. Bray e J. Macedo (2019), ao avaliar a estabilidade de uma barragem hipotética. O artigo apresenta a aplicabilidade e relevância de novas metodologias na avaliação sísmica de barragens, fundamentais para garantir a segurança e contribuir para o desenvolvimento sustentável das estruturas geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação Sísmica, Análise de Estabilidade, Sismicidade, Risco Sísmico, Coeficiente Pseudoestático.

ABSTRACT: The assessment of dam stability under seismic conditions has become increasingly crucial given the significant increase in earthquakes followed by dam failures. International guidelines, such as the Global Industry Standard for Tailings Management (ICMM, 2020), address seismic risk as a fundamental criterion throughout the life cycle of dams. The application of analyses based on the Newmark method (1965) forms the basis for preliminary studies on the seismic performance of geotechnical structures (J. Bray and J. Macedo, 2017; J. Bray and J. Macedo 2018). Although these analyses do not replace the advantages of nonlinear dynamic analysis, obtaining a sensitivity of the expected earthquake-induced permanent displacement before conducting more complex analyses is valuable (J. Bray and J. Macedo, 2019). This paper discusses the analysis of seismic risk studies, including the definition of associated criteria and return periods, and the methodology for calculating the pseudo-static coefficient, adopting the proposal by j. Bray and J. Macedo (2019), when assessing the stability of a hypothetical dam. The article presents the applicability and relevance of new methodologies in seismic assessment of dams, crucial for ensuring safety and contributing to the sustainable development of geotechnical structures.

KEYWORDS: Seismic Assessment, Stability Analysis, Seismicity, Seismic Risk, Pseudo-Static Coefficient.

1 INTRODUÇÃO

Avaliar a performance sísmica de estruturas geotécnicas, apesar de uma prática antiga para países e regiões com sismicidade elevada, é uma prática nova para os engenheiros brasileiros. Antes da ruptura da Barragem de Fundão, em Mariana/MG, na data de 15 de novembro de 2015, não havia legislação que definisse os requisitos mínimos exigidos para estudos de risco sísmico ou avaliação de performance sísmica das estruturas geotécnicas de mineração. A pouca prática, quando aplicada, advinha da referência de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (Eletrobrás, 2003), onde se recomenda a aplicação de uma avaliação sísmica pseudoestática com coeficientes de 5% de aceleração da gravidade (0,05 g) no sentido horizontal, e aproximadamente 2/3 desta aceleração (0,03 g) para a vertical. O referido documento indica que tais valores podem ser majorados em caso de condições geológico-estruturais do local sejam desfavoráveis.

Em 2017, a normativa referente à estabilidade de barragens (ABNT NBR 13.028) foi atualizada, e desde então é exigido a realização de estudos sísmicos para barragens de rejeito. A norma indica a adoção de critérios

de projeto conforme o *Canadian Dam Association* (CDA), além da adoção de um fator de segurança mínimo para a avaliação da estabilidade da estrutura sob o sismo (pseudostática) de 1,1 e, em consonância com a atualização, a Portaria ANM Nº 70.389, de 17 de maio de 2017 indicou tal normativa como referência para tais estudos sísmicos.

Com a atualização do *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams* pela CDA, em 2019, e com o documento produzido pelo ICMM, em 2020, intitulado Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos, maiores exigências e, por consequência, maior atenção foi dada às avaliações de performance sísmica para as barragens de rejeito na mineração. Atualmente, estes documentos são as referências para esta avaliação, e têm sido adotados pelas mineradoras para elevar o padrão de gestão corporativa e de critério de segurança, principalmente para estruturas geotécnicas classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) alto.

Neste contexto, torna-se primordial entender os critérios, premissas, conceitos e o como proceder para o desenvolvimento da avaliação de estabilidade sísmica de estruturas geotécnicas. Dado as condições exigidas em norma, tais análises podem se tornar restritivas para o projeto ou avaliação geotécnica das estruturas, bem como direcionar para estudos e avaliações mais complexas como análises dinâmicas.

No geral, a avaliação da estabilidade sísmica de barragens pode ser realizada por análises pseudostáticas, métodos baseados em deslocamento ou análises numéricas dinâmicas de tensão deformação (K. Andrianopoulos *et al.* 2014). Este trabalho aborda a primeira metodologia, referente à exigida pela norma ABNT NBR 13.028/2017 e pelo CDA (2019).

2 OBJETIVO

Este trabalho objetiva apresentar as etapas de estudo e avaliação da estabilidade sísmica de uma barragem de rejeitos hipotética. Serão apresentados os critérios e premissas solicitados pelas normativas nacionais e diretrizes internacionais, a definição de parâmetros, obtidos por meio do *Probability Seismic Hazard Analysis* (PSHA), a aplicação da metodologia desenvolvida por J. Bray e J. Macedo (2019) para o cálculo do coeficiente pseudostático e os resultados encontrados.

3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Para avaliar a estabilidade sísmica de uma estrutura geotécnica como uma barragem de rejeitos o primeiro ponto a ser considerado são os fatores limitantes de projeto.

Conforme supracitado, a Portaria DNPM Nº 70.389, substituída posteriormente pela ANM Nº 95 de 7 de fevereiro de 2022 e posteriormente alterada pela ANM Nº 130 de 24 de fevereiro de 2023, indica a normativa ABNT NBR 13.028/2017 como referência para os critérios de segurança para estruturas como barragens de rejeito, contenção de sedimentos ou reservação de água na mineração. Na normativa, exige-se que seja atendido um fator de segurança mínimo de 1,1 para a análise de estabilidade com solicitação sísmica, devendo ser considerado o nível máximo do reservatório, e sendo feita a análise de montante e jusante.

A normativa também indica como referência os critérios adotados pelo CDA, que em sua última revisão, estão também em consonância com os critérios exigidos para o GISTM (*Global Industry Standard on Tailings Management*). O principal critério exigido por estes documentos se trata do tempo de retorno associado à ocorrência do sismo. A Tabela 1 apresenta os critérios exigidos pelo CDA para construção, operação e fase transicional, bem como para a fase de fechamento e pós-fechamento das estruturas.

Tabela 1. Níveis-alvo para o risco de terremotos.

Classificação da Barragem	Probabilidade Anual de Excedência - Terremotos	
	Construção, Operação e Transicional	Fechamento e Pós-Fechamento
Baixo	1/100	1/1.000
Significante	Entre 1/100 e 1/1.000	1/2.475
Alto	1/2.475	Entre 1/2.475 e 1/10.000 ou MCE ¹
Muito Alto	Entre 1/2.475 e 1/10.000 ou MCE ¹	1/10.000 ou MCE ¹
Extremo	1/10.000 ou MCE ¹	1/10.000 ou MCE ¹

¹ MCE sigla para *Maximum Credible Earthquake* ou Máximo Terremoto Crível.

Conforme indicado na tabela, a definição do tempo de retorno a ser adotado nos cálculos para as fases do ciclo de vida das estruturas está relacionado com a classificação de criticidade, que leva em consideração a população em risco e com as perdas incrementais associadas aos valores ambientais e culturais, bem como econômicas.

Na próxima etapa da avaliação, utiliza-se o tempo de retorno associado ao critério de projeto da estrutura associado aos resultados de um estudo de PSHA. O produto final de um PSHA oferece um mapa de ameaça sísmica para uma determinada região, indicando as curvas de nível referentes à aceleração espectral (S_a) para o valor padrão de 5% de amortecimento crítico, dependentes também do período fundamental (T_s). O referido estudo também oferece um gráfico com as curvas de aceleração espectral *versus* período fundamental para cada tempo de retorno. A Figura 1 apresenta os resultados relevantes.

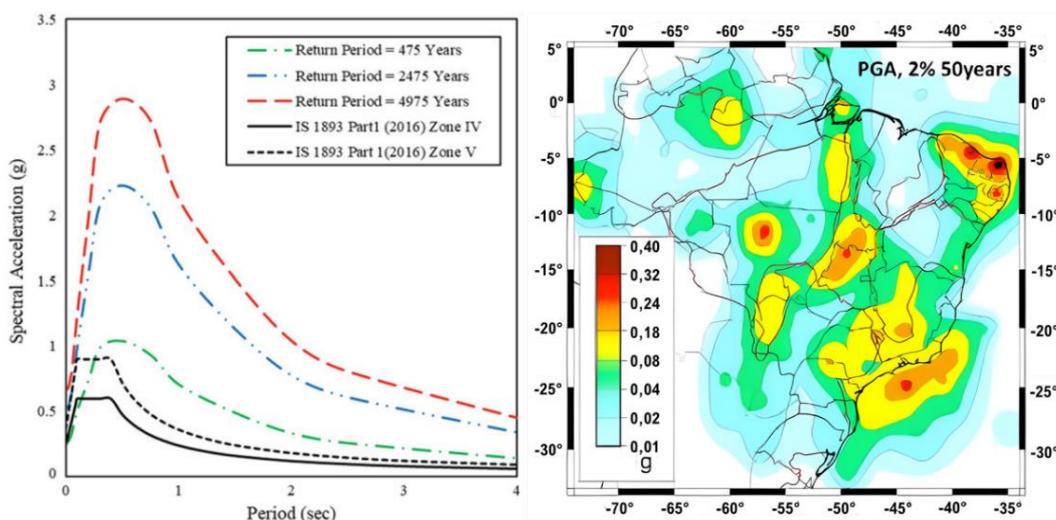


Figura 1. Resultados de estudo de PSHA. (Puri, S. O. *et al.* (2020); Assumpção *et al.* (2016) modificado).

A partir de um estudo de ameaça sísmica é possível iniciar o desenvolvimento dos estudos para avaliação da estabilidade da estrutura geotécnica submetida à esforços sísmicos. A análise pseudoestática da estabilidade da estrutura consiste em aplicar um coeficiente de aceleração, proporcional à aceleração da gravidade (g), no modelo geotécnico, adicionando esta aceleração como uma variável horizontal e, por vezes, também vertical.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas metodologias para obter a aceleração da gravidade. Neste trabalho será abordada uma metodologia mais atualizada, desenvolvida por J. Bray e T. Travasarou (2009) e atualizada por J. Bray e J. Macedo (2019). A metodologia se baseia na avaliação da probabilidade da estrutura geotécnica (talude), quando submetida ao sismo, exceder um determinado deslocamento permanente crítico, sendo este deslocamento admissível um critério de projeto a ser definido pelo engenheiro.

O primeiro passo da metodologia é estimar o período fundamental (T_s) referente à estrutura. Para o caso de uma barragem, J. Bray e J. Macedo (2019) recomendam a Equação 1, baseada na relação entre altura total da estrutura H e o valor referente ao V_s (*shear wave velocity*) do material que compõem a estrutura. A Figura 2 apresenta a exemplificação das equações para se estimar o período fundamental de potenciais escorregamentos.

$$T_s = \frac{2,6H}{V_s} \quad (1)$$

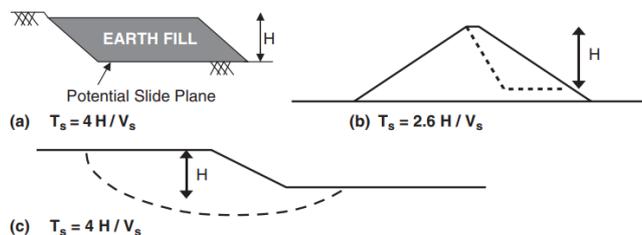


Figura 2. Estimativas do período fundamental de potenciais escorregamentos de bloco (J. Bray, 2007).

O valor de V_s é obtido por meio dos resultados de ensaios de SCPTu, sísmica de refração (método sísmico) ou por correlações de CPT, em função do tipo de solo e do SBT (*soil behaviour type*) e I_c (P. K. Robertson, 2022). Em casos que não há este tipo de ensaio disponível, a normativa brasileira referente a estruturas resistentes ao sismo, ABNT NBR 15.421 de 23 de maio de 2023, indica faixas de valores de V_s médio para os 30 metros superiores da superfície, separado por classes de terreno que vão de rocha sã ($V_s \geq 1.500$ m/s) até o solo mole ($V_s \leq 180$ m/s e $N_{SPT} \leq 15$). Tais valores podem ser utilizados como referência para estudos preliminares ou adotados a depender da complexidade do projeto.

Com o valor de T_s determinado, obtém-se o valor da aceleração espectral S_a ($1,3T_s$) pelos estudos de ameaça sísmica, considerando o tempo de retorno referente à estrutura, conforme sua criticidade. A adoção do S_a ($1,3T_s$) foi obtida por meio de regressão, realizada por J. Bray e J. Macedo (2019), para representar o amortecimento de 5% da aceleração sísmica, dado que este parâmetro reflete melhor a quantidade de degradação local e possui menor desvio padrão.

Caso o valor do período não seja compatível com o mapa de risco sísmico, recomenda-se adotar o mapa com o valor de S_a maior mais próximo.

Outra variável necessária para a metodologia é referente ao momento de magnitude do sismo (M_w), medida de magnitude de terremotos em termos de energia liberada, introduzida por T. Hanks e H. Kanamori (1979). Para este estudo, será adotado o maior terremoto registrado no Brasil, referente à 6,6 na escala Richter ($M_L = 6,6$), ocorrido na data de 20 de janeiro de 2024, em Ipixuna no estado do Amazonas. Conforme a Figura 3 que apresenta um gráfico desenvolvido no Wolfram Alpha®, este sismo corresponde à um $M_w = 6,8$.

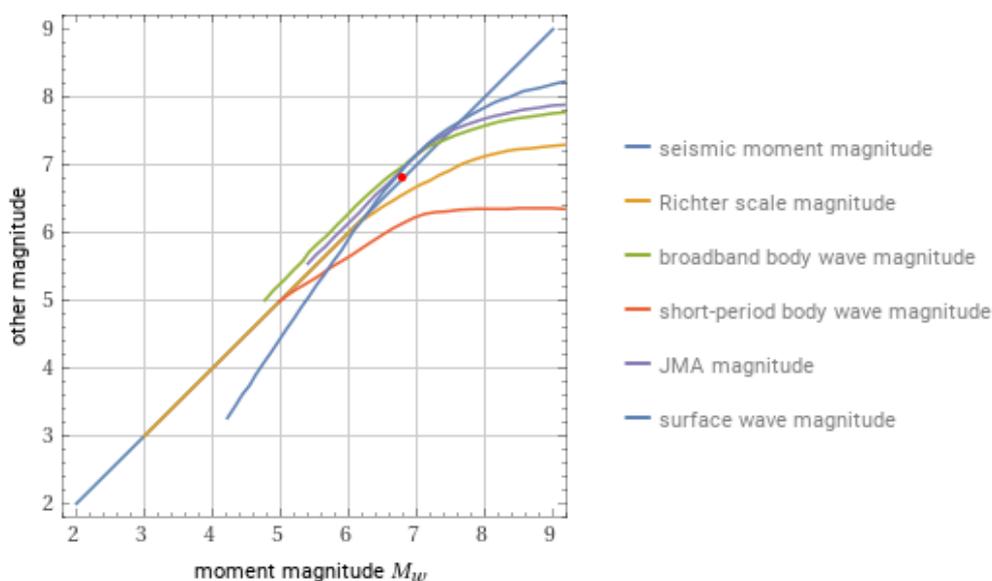


Figura 3. Comparação de M_w com outras magnitudes.

O último fator a ser definido se refere ao deslocamento permanente admissível para projeto. Tal valor deve ser adotado de maneira que, mesmo que haja uma probabilidade de excedência para tal, seja possível garantir com segurança a estabilidade da estrutura. Diversas fontes citam diferentes valores e critérios para o deslocamento admissível do solo para análises sísmicas. A Tabela 2 apresenta uma consolidação de alguns estudos.

Tabela 2. Deslocamento admissível para estruturas de terra submetidas ao sismo.

Deslocamento Admissível	Fonte
5 cm	J Bray e J. Macedo (2019)
15 cm	APEGBC ¹ e FHWA ²
0,1 – 10 cm	F. Rollo e S. Rampello (2021)
5 – 15 cm	Idriss (1985); Wilson e Keefer (1985)
10 cm	I. Bozbey e O. Gundogdu (2011)

¹ Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia

² Federal Highway Administration

Com base nas variáveis apresentadas, apresenta-se abaixo as equações que governam a metodologia apresentada por J. Bray e J. Macedo (2019) para obter o coeficiente pseudoestático para análise de estabilidade de estruturas geotécnicas.

$$k = \exp\left(\frac{-a+\sqrt{b}}{0,49}\right) \quad (2)$$

Onde:

$$a = 2,491 - 0,344\text{Ln}(S_a(1,3T_s)) \quad (3)$$

$$b = a^2 - 0,98 \left(\text{Ln}(D_a) - a1 - 2,703\text{Ln}(S_a(1,3T_s)) + 0,089\text{Ln}(S_a(1,3T_s)) \right)^2 - a2T_s - a3(T_s)^2 - 0,6070Mw - \varepsilon \quad (4)$$

Para este caso, $a1=5,894$, $a2=3,152$ e $a3=-0,910$, dado que o valor de $T_s \geq 0,10$ s.

J. Bray e J. Macedo (2019) incluem a variável ε , definida como o desvio padrão para a probabilidade de excedência do deslocamento admissível adotado. Para um valor de $\varepsilon = 0$, tem-se 50% de probabilidade de excedência do deslocamento admissível indicado, já para o valor de 0,74, correspondente à 1,0 desvio padrão, tem-se 16% de probabilidade de excedência do deslocamento admissível. Os próprios autores informam que é razoável utilizar a média ($\varepsilon = 0$) para os estudos, mas que em projetos críticos se deve utilizar um percentil menor ($\varepsilon = \sigma = 0,74$).

3.1 Estrutura Alvo do Estudo

Para exemplificar os resultados do desenvolvimento de uma análise pseudoestática pela metodologia de J. Bray e J. Macedo (2019), optou-se por considerar uma estrutura geotécnica hipotética. A estrutura em questão é definida como uma barragem de rejeitos, com altura de 40 m, construída pela metodologia de alteamento à montante, utilizando o próprio rejeito da praia compactado para construção dos diques de alteamento, com exceção do dique de partida. Ao realizar a classificação da barragem, de acordo com a ANM nº 95/2022, classifica-se por DPA alto e muito alto ao considerar o CDA (2019). A estrutura ainda está em operação.

O cenário hipotético considera a existência de ensaios de SCPTu já realizados na barragem. Os perfis observados foram muito semelhantes, onde basicamente toda a profundidade é constituída por rejeitos. A Figura 3 apresenta o resultado de um destes ensaios.

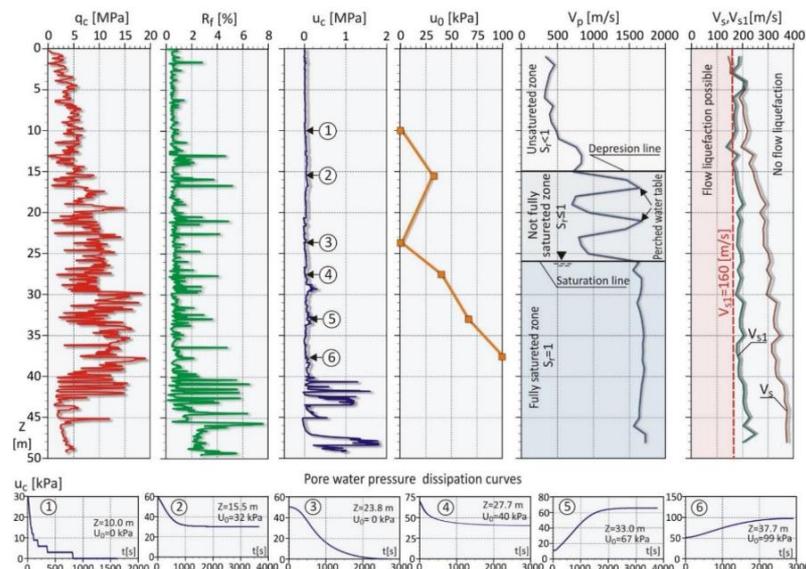


Figura 4. Resultado de ensaio de SCPTu. (Tschuschke, W. *et al.* 2020)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados e parâmetros informados no item 3, é possível obter o coeficiente pseudoestático.

Para o valor apresentado de V_s , adotou-se a banda inferior dos resultados obtidos por SCPTu como 160 m/s, partindo do pressuposto de que a estrutura é constituída basicamente de rejeitos (homogênea). Tal valor está aderente com o indicado pela ABNT NBR 15.421/2023, da qual indica a adoção do valor de 180 m/s para materiais com $N_{SPT} \leq 15$. Assim, o valor para o período espectral T_s é de 0,65 s. Ao considerar a dregradação de $1,3 T_s$, obtém-se 0,85 s.

Para obter a aceleração espectral, supõem-se que foi realizado um estudo de ameaça sísmica para a mina na qual a barragem está situada. O referido estudo apresenta as curvas de aceleração espectral *versus* período fundamental semelhantes à imagem da Figura 1, entretanto, reduzidas à 10% do valor indicado, ou seja, o pico para TR de 4.975 anos é de aproximadamente 0,3.

Conforme indicado, observa-se que a população em risco se encontra na ZSS (Zona Secundária de Salvamento), que as sirenes estão em pleno funcionamento, e a estrutura possui PAEBM (Plano de Acionamento de Emergência para Barragens de Mineração). Além disso, a barragem possui monitoramento em tempo real, 24 horas por dia, para observar quaisquer indícios de alterações que possam levar à sua ruptura. Portanto, diante destas informações, optou-se por utilizar um tempo de retorno de 4.975 anos. Caso a população em risco fosse maior, e estivesse situada na ZAS (Zona de Autossalvamento), ou alguns dos demais critérios supracitados não atendessem ao estado da arte da segurança, o tempo de retorno de 10.000 anos ou MCE deveria ser adotado.

Para a curva de tempo de retorno de 4.975 anos e T_s de 0,85 s, o valor referente à aceleração espectral é de aproximadamente $S_a = 0,25 g$.

Assim, aplicando os valores de $M_w = 6,8$ e 1 desvio padrão ($\varepsilon = 0,74$), necessita-se apenas definir o deslocamento permanente admissível. Neste estudo, optou-se por adotar o valor de 5 cm, citado por J. Bray e J. Macedo (2019) e dentro dos intervalos indicados na Tabela 2.

Portanto, o resultado obtido para o coeficiente pseudoestático foi de $k = 0,14 g$, ou 14% de aceleração de g , aplicado horizontalmente à estrutura alvo.

De forma comparativa, realizou-se uma análise de estabilidade para a estrutura, que atendesse os fatores de segurança para análise não drenada de pico ($F.S. \geq 1,3$), de acordo com a ANM nº 95, utilizando-se de valores de resistência dos materiais relativos. Foi aplicado para o rejeito disposto hidraulicamente a razão de resistência não drenada e mohr-coulomb para os demais materiais. Ao realizar a análise pseudoestática, com o coeficiente pseudoestático de 0,14 g, obteve-se um resultado de F.S. de 0,59, menor que o exigido pela ANM para análise pseudoestática ($F.S. \geq 1,1$) e menor do que o 1,0 exigido pela própria metodologia empregada. As análises foram realizadas no *software* Slide2 da Rocscience.

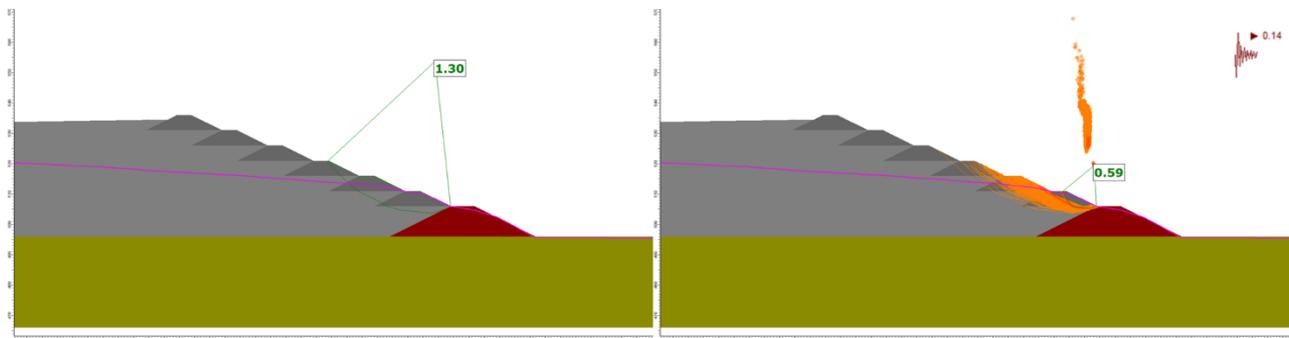


Figura 5. Análises de estabilidades em condição não drenada e não drenada com sismo.

Para avaliar em profundidade os resultados, importa verificar quais seriam os deslocamentos admissíveis. A partir destes resultados, pode-se avaliar pelo método do deslocamento crítico a probabilidade de os referidos deslocamentos permanentes serem admissíveis para a estabilidade global da estrutura ou não. Ainda, ressalta-se que a análise pseudoestática é uma análise preliminar de performance sísmica e importa para obter a sensibilidade do deslocamento permanente induzido pelo sismo esperado antes de conduzir análises mais complexas (J. Bray e J. Macedo, 2019). Os resultados obtidos de deslocamento esperado, com probabilidade de excedência de 16%, para que a estrutura obtenha os fatores de segurança de 1,1 (ANM

nº95/2022) e 1,0 (metodologia aplicada) são, respectivamente, 14 cm ($k = 0,082$) e 10 cm ($k = 0,095$). A Figura 6 apresenta os referidos resultados.

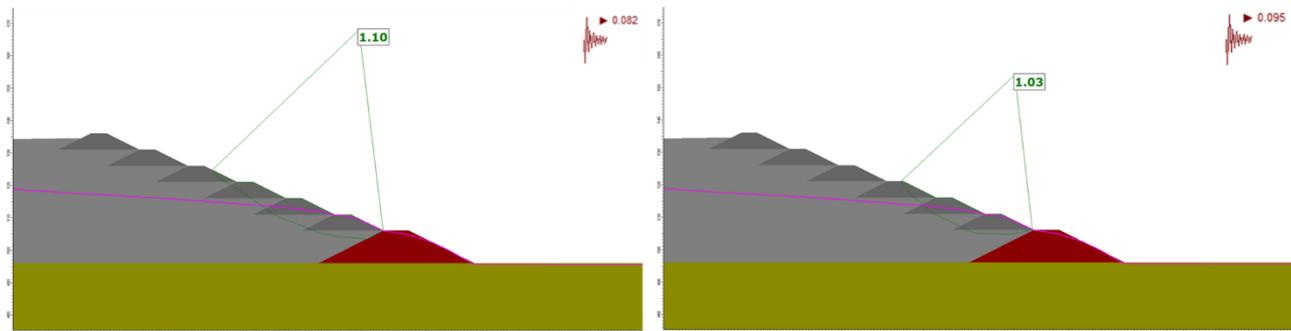


Figura 6. Análises de estabilidades em condição não drenada com sismo.

Conforme exposto acima, a estrutura hipotética, com as premissas iniciais adotadas, não atendeu aos critérios de estabilidade estabelecidos pelas normativas em vigor para o Brasil (ANM nº 95/2022), nem as diretrizes internacionais (CDA, 2019). Entretanto, foi observado que, para o fator de segurança mínimo indicado em norma (1,1), o deslocamento admissível, com probabilidade de excedência de 16%, é de aproximadamente 14 cm, e de 10 cm para os critérios do CDA (fator de segurança de 1,0 para análise pseudoestática).

Conclui-se com este trabalho que é possível aplicar a metodologia de J. Bray e J. Macedo (2019) para a análise de estabilidade com avaliação pseudoestática para atender as normativas em vigor. A metodologia também fornece informações importantes para o desenvolvimento de análises mais complexas, como método de deslocamento crítico ou análise dinâmica.

Mesmo não validada por um teste objetivo, as análises probabilísticas de risco sísmico são utilizadas há mais de 50 anos pelo governo e indústria em diversas aplicações, desde mapas nacionais de risco sísmico à critérios de normas para construção de edifícios. Estas análises se baseiam em suposições que conflitam com a física dos terremotos, onde alguns terremotos extremamente danosos ocorreram em regiões indicadas como de baixo risco (F. Mulargia *et al.* 2017). Mesmo assim, é informativo realizar análises de estabilidade pseudoestáticas como ferramenta de triagem ou dimensionamento preliminar (J. Bray e J. Macedo 2019).

Ressalta-se que, para alcançar resultados significativos, este método deve se basear em parâmetros representativos da solicitação sísmica da estrutura a ser avaliada. Se existe a possibilidade de grande perda de resistência do solo, como a ocorrência de liquefação, o foco do estudo deve se estender à avaliação deste comportamento e das consequências associadas ao desempenho de todo o sistema (J. Macedo e G. Candia, 2020).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à TRACTEBEL ENGINEERING LTDA pelo apoio e fornecimento das ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 15421. *Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução ANM nº 95. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Brasília.
- Agência Nacional de Mineração (2023). Resolução ANM nº 130. *Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências*. Brasília.

- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., Bouckovalas, G. D., Karamitros, D. K. (2014). Insight into the seismic response of earth dams with an emphasis on seismic coefficient estimation. *Computers and Geotechnics*, v. 55, p. 195-210.
- APEGBC. *Guidelines for legislated landslide assessments for proposed residential development in British Columbia*. Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC; 2010.
- Assumpção, M. et al. (2016) Terremotos no Brasil: Preparando-se para eventos raros. Sociedade Brasileira de Geofísica, *Boletim SBGf*, n. 96, p. 25-29.
- Bozbey I., Gundogdu O. (2011). A methodology to select seismic coefficients based on upperbound Newmark displacements using earthquake records from Turkey. *Soil Dynam Earthq Eng*, v. 31(3). p. 440-451.
- Bray J. D., Travasarou T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. v.133(4), p. 381-392.
- Bray J. D., Travasarou T. (2009). Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. v. 135(9). p. 1336-1340.
- Bray J. D., Macedo J. (2017). 6th Ishihara lecture: simplified procedure for estimating liquefaction induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 102, p. 215-231.
- Bray J. D., Macedo J, Travasarou T. (2018). Simplified procedure for estimating seismic slope displacements for subduction zone earthquakes. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* v. 144(3):04017124.
- Bray J. D., Macedo J. (2019). Procedure for estimating shear-induced seismic slope displacement for Shallow Crustal Earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. v. 145(12):04019106.
- Canadian Dam Association (2019). *Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*. CDA, Toronto, 61 p.
- Global Tailings Review (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. Global Tailings Review. ICMM, UNEP, PRI. 40 p.
- FHWA (2011). *LRFD Seismic analysis and design of transportation geotechnical features and structural foundations*. NHI Course n° 130094 Reference Manual Geotechnical Engineering Circular n°. 3.
- Hanks, T. C., Kanamori, H. (1979). A moment Magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*, v. 84, n° B5, p. 2348-2350.
- Idriss, I. M. (1985). *Evaluating seismic risk in engineering practice*. Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, p. 12-16.
- Macedo, J., Candia, G. (2020). Performance-based assessment of the seismic pseudo-static coefficient used in slope stability analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 133, p. 106-109.
- Mulargia, F., Stark, P. B., Geller, R. J. (2017). Why is Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) still used? *Physic of the Earth and Planetary Interiors*, v. 264, p. 63-75.
- Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*. v. 15, p. 139-160.
- Robertson, P.K., Cabal, K. (2022). Guide to Cone Penetration Testing: A concise and practical applications guide. 7th ed. *P.K. Robertson Consulting*, Washington, DC, USA, 163p.
- Rollo, F., Rampello, S. (2021). Probabilistic assessment of seismic-induced slope displacements: an application in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*. v. 19, p. 4261-4288.
- Puri, S. O., Puri, N., Naval, S., Jain, A. (2020). Probabilistic Seismic Hazards Maps for District of Pathankot. In book: *Smart Cities – Opportunities and Challenges*, v. 38 p. 1-11.
- Tschuschke, W., Sławomir G., Magdalena W., Maciej K., Paweł S. (2020). The Application of the Seismic Cone Penetration Test (SCPTU) in Tailings Water Conditions Monitoring. *Water* v. 12(3), 737.
- Wilson, R. C., Keefer, D. K. (1985). Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1360, p. 317–345.