DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/31

Comportamento sísmico de uma barragem de rejeitos por meio de abordagem baseada em desempenho

Celso Antero Ivan Salvador Villalobos
Engenheiro, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Rio de Janeiro, Brasil, celsosalvador0513@gmail.com

Rebeca Pereira Fernandes
Engenheira, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Rio de Janeiro, Brasil, rebeca.pereira.fernandes@hotmail.com

Celso Romanel
Pesquisador, PUC Rio, Rio de Janeiro, Brasil, celso.romanel@gmail.com

RESUMO: Este estudo apresenta uma abordagem baseada em desempenho para avaliar o comportamento dinâmico de uma barragem de rejeitos construída pelo método a montante. A caracterização da ameaça sísmica foi realizada por meio de metodologia probabilística, com geração de registros de aceleração de projeto, ajustados espectralmente, compatíveis em termos de magnitude de momento, distância fonte-sítio e velocidade de propagação de ondas cisalhantes nos primeiros 30 metros de profundidade do sítio (V_{S30} = 800 m/s). Foram considerados dois períodos de retorno (2.500 e 10.000 anos), definidos em função da classificação de consequências de colapso estabelecida pelas diretrizes internacionais do *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM). A modelagem numérica foi executada no software Plaxis 2D utilizando modelos constitutivos elastoplásticos para carregamentos cíclicos (PM4Sand e PM4Silt). Foram avaliados deslocamentos permanentes, acelerações espectrais e variações de poropressão em diferentes cenários sísmicos. Os resultados evidenciaram zonas com comportamento contrátil e dilatante, além de quantificar os efeitos sísmicos sobre a resposta dinâmica da estrutura. Conclui-se que uma análise baseada em desempenho, aliada a técnicas avançadas de modelagem e caracterização sísmica, constitui uma ferramenta eficaz para a avaliação da segurança de barragens de rejeitos e para o aprimoramento das práticas de gestão de riscos na engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Abordagem baseada em desempenho, Barragem de rejeitos a montante, Comportamento sísmico, Modelagem numérica, Avaliação probabilística de ameaça sísmica.

ABSTRACT: This study presents a performance-based approach to evaluate the dynamic behavior of a tailings dam constructed with the upstream method. Seismic hazard characterization was performed using a probabilistic methodology, generating spectrally adjusted design acceleration records compatible in terms of moment magnitude, source-site distance, and shear wave propagation velocity in the first 30 meters of site depth (V_{S30} = 800 m/s). Two return periods (2,500 and 10,000 years) were considered, defined according to the collapse consequence classification established by the international guidelines of the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). Numerical modeling was performed in Plaxis 2D software using elastoplastic constitutive models for cyclic loading (PM4Sand and PM4Silt). Permanent displacements, spectral accelerations, and pore pressure variations were evaluated in different seismic scenarios. The results indicated zones with contractile and dilatant behavior, in addition to quantifying the seismic effects on the dynamic response of the structure. It is concluded that a performance-based analysis, combined with advanced seismic modeling and characterization techniques, constitutes an effective tool for evaluating the safety of tailings dams and for improving risk management practices in geotechnical engineering.

KEYWORDS: Performance-Based Approach; Upstream Tailings Dam; Seismic Behavior; Numerical Modeling; Probabilistic Seismic Hazard

1 INTRODUÇÃO

Este estudo apresenta uma abordagem baseada em desempenho para investigar o comportamento dinâmico de uma barragem de rejeitos construída pelo método de alteamento a montante. A escolha desse tipo de estrutura como objeto de análise se justifica pela relevância das barragens de rejeitos no contexto da mineração nacional e pela necessidade de compreender sua resposta dinâmica frente a diferentes cenários de ameaça sísmica.

2 MODELAGEM DA BARRAGEM

A modelagem numérica foi realizada com o software Plaxis 2D utilizando modelos constitutivos elastoplásticos para carregamentos cíclicos, o que permitiu simular de forma mais realista o comportamento dos materiais frente às solicitações sísmicas. Para representar a estrutura, foram definidas quatro unidades geotécnicas principais, conforme ilustrado nas Fig. 1 e 2: a) rejeitos (R), subdivididos em tipos R11, R12, R21, R22, R31 e R32; b) dique de partida (DP), constituído por aterros compactados de solo aluvial na base da estrutura; c) diques de alteamento (DA), formados por aterros de solo aluvial e/ou rejeito grosso que elevam gradualmente a altura da barragem, podendo ou não ser compactados; d) fundação rochosa (FR) caracterizada como rocha branda com velocidade de onda S de 800 m/s.

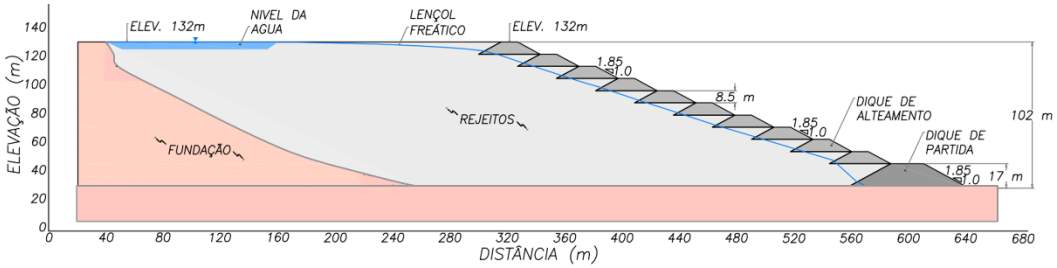


Figura 1. Configuração geométrica da seção transversal da barragem de rejeitos analisada.

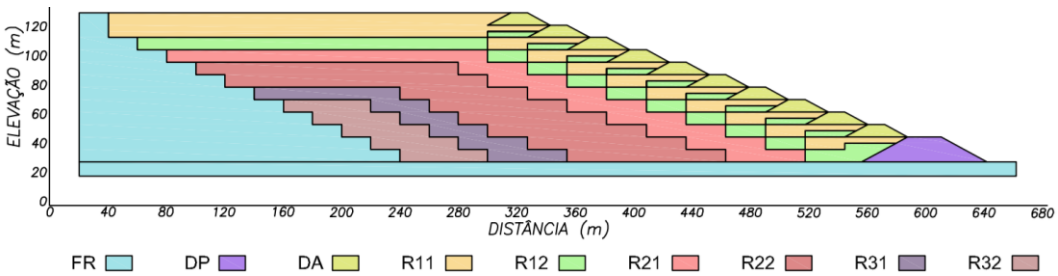


Figura 2. Distribuição das unidades geotécnicas na seção transversal da barragem de rejeitos analisada.

Para cálculo da resposta dinâmica da estrutura foram considerados os seguintes modelos constitutivos: a) modelo elástico linear para a fundação nas simulações das etapas estática e cíclica; b) modelo elastoplástico Hardening Soil Small (HSM) para os rejeitos, dique de partida e diques de alteamento para simulação do carregamento estático; c) modelo elastoplástico Hardening Soil Small (HSM) com adição de pequena quantidade de amortecimento de Rayleigh para o dique de partida e diques de alteamento na simulação do carregamento cíclico; d) modelos PM4Sand (Boulanger & Ziotopoulou, 2023) e PM4Silt (Boulanger & Ziotopoulou, 2018) para os rejeitos na simulação do carregamento cíclico, com parâmetros listados nas Tab. 1 e 2. Os rejeitos R11, R12, R21 e R22 foram classificados como areia siltosa (SM) enquanto que os rejeitos R31 e R32 foram classificados como silte argiloso de baixa plasticidade (ML).

Tabela 1. Parâmetros do modelo PM4Sand utilizado no comportamento cíclico de rejeitos SM.

Material	**Descrição**	**D_R**	**G_0**	**hp_o**	**e_{max}**	**e_{min}**
			(-)	(-)	(-)	(-)
R11	Areia siltosa	0,3	430,3	0,02	1,25	0,49
R12	Areia siltosa	0,3	430,3	0,40	1,25	0,49
R21	Areia siltosa	0,5	624,9	0,40	1,25	0,49
R22	Areia siltosa	0,5	624,9	0,85	1,25	0,49

Tabela 2. Parâmetros do modelo PM4Silt utilizado no comportamento cíclico de rejeitos ML.

Material	**Descrição**	**γ_{unsat}**	**γ_{sat}**	**$S_{u,cs}/\sigma'_v$**	**G_0**	**hp_o**
		(kN/m^3)	(kN/m^3)	(-)	(-)	(-)
R31	Silte baixa plasticidade	19	20	0,2	350	20
R32	Silte baixa plasticidade	19	20	0,4	400	30

Para estimativa da resistência à liquefação dos rejeitos, foram utilizados os dados publicados por Wijewickreme et al. (2005) obtidos de ensaios cíclicos triaxiais (TXC) e ensaios cíclicos de cisalhamento direto (CDSS), expressos em termos da razão de resistência cíclica (CRR) e do número de ciclos para o início da liquefação. Adotou-se como critério de início de liquefação o valor do parâmetro de poropressão r_u=0,75 e deformação cíclica cisalhante γ=3,75% (amplitude simples) nos ensaios CDSS. Para padronização da base de dados utilizada, os resultados dos ensaios triaxiais cíclicos foram convertidos para valores equivalentes de ensaios CDSS, utilizando a Eq. 1 (Cappellaro et al., 2017).

$$CSR = (\tau/\sigma'_v)_{campo} = \frac{1+2K_0}{3} \times \left(\frac{|q|}{2\sigma'_c}\right)_{triaxial} \quad (1)$$

onde σ'_v é a tensão vertical efetiva, K_0 o coeficiente de empuxo no repouso, q a tensão de desvio e σ'_c a tensão efetiva de confinamento nos ensaios CTX.

Foram construidas curvas de resistência cíclica (CRR) dos rejeitos, obtidas a partir da calibração dos modelos constitutivos PM4Sand e PM4Silt com uso da ferramenta SoilTest do Plaxis 2D. Para os rejeitos classificados como areia siltosa (SM), com densidades relativas (D_R) de 30% e 50%, foram obtidos valores do parâmetro h_{p0} entre 0,02 e 0,85 no modelo PM4Sand. Para os rejeitos classificados como silte argiloso de baixa plasticidade (ML), o modelo PM4Silt foi calibrado com valores da razão da resistência não drenada no estado crítico $\left(S_{u,cs}/\sigma'_v\right)$ entre 0,2 e 0,4 e parâmetro h_{p0} entre 20 e 30. As curvas ajustadas representam o comportamento cíclico dos materiais e delimitam a faixa de variação das resistências dinâmicas, permitindo avaliar o potencial de início de liquefação na areia siltosa (SM) e o amolecimento cíclico no silte argiloso de baixa plasticidade (ML).

O tamanho máximo dos elementos finitos da malha foi definido segundo o critério de Kuhlemeyer e Lysmer (1973), relacionando a frequência de corte dos registros sísmicos ao mínimo comprimento de onda S. De acordo com esta recomendação, o tamanho dos elementos variou entre 1,0 m e 30,0 m, sendo adotado o valor 1,0 m para os rejeitos. A qualidade da malha de elementos finitos foi 0,70, o que atende às recomendações do Plaxis 2D para convergência numérica.

A frequência fundamental de vibração da barragem foi estimada por meio de simulação elástica não amortecida, com análise espectral de registros de velocidade. Os resultados indicaram frequências entre 0,25 Hz e 4,80 Hz, sendo adotado o valor de 2,70 Hz como referência para os cálculos dinâmicos. Os coeficientes de amortecimento de Rayleigh (α e β) foram definidos com base nessa simulação elástica, considerando como frequências para definição das constantes de Rayleigh a frequência fundamental e a frequência correspondente a cinco vezes a frequência fundamental. Para os rejeitos, foi adotado exclusivamente o amortecimento histerético, independente da frequência. O tempo de cálculo dinâmico foi discretizado conforme $\delta t=\Delta t/(m\times n)$, em que m representa o número máximo de passos e n o número de subpassos, definidos individualmente para cada registro sísmico.

3 REGISTROS SÍSMICOS

A investigação do comportamento dinâmico da barragem foi feita considerando múltiplos cenários sísmicos, de modo a representar adequadamente as condições de carregamento cíclico da estrutura. Inicialmente foi executado um estudo de ameaça sísmica probabilística com o software de código aberto OpenQuake para obtenção das curvas de ameaça sísmica, os espectros de resposta uniformemente provável e a desagregação sísmica. As curvas de ameaça sísmica permitem estimar os níveis de aceleração espectral (Sa) para diferentes períodos e taxas de excedência anual da aceleração horizontal (AEP). Os espectros de resposta, definidos para taxas de excedência de 1/2.500 e 1/10.000 anos, mostram os níveis medianos de aceleração horizontal para cada período espectral (Fig. 3). Já a desagregação sísmica identifica as combinações de magnitude e distância mais relevantes que contribuem para os cenários de ameaça considerados.

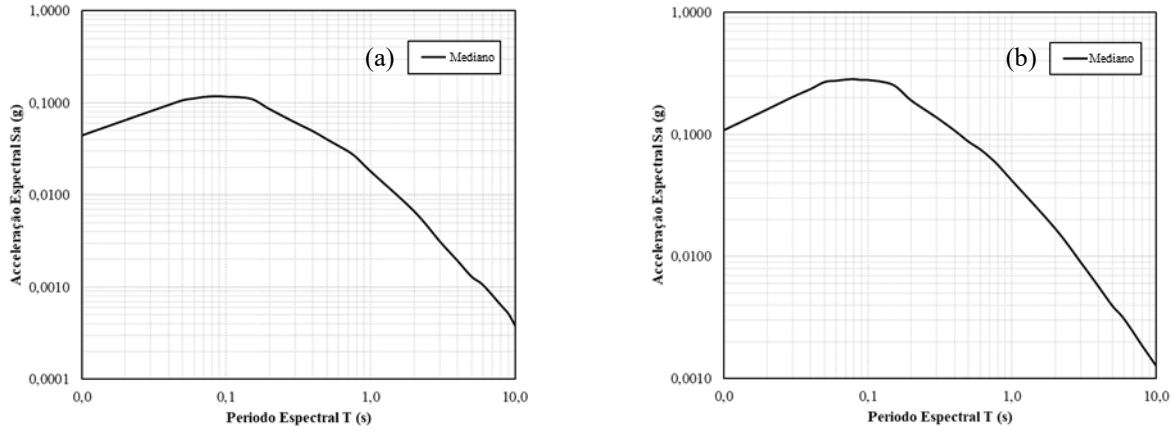


Figura 3. Espectros de resposta medianos da aceleração horizontal obtidos na análise probabilística de ameaça sísmica para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

Para geração dos registros sísmicos de projeto foram selecionados no mínimo cinco registros de terremotos naturais (*seed motions*) que representassem adequadamente as condições do sítio, localizado em região continental estável. Foram considerados registros de aceleração medidos em estações sismográficas com velocidade de onda cisalhante próxima a 800 m/s (Tab. 3 e 4). A escolha destes registros, com consultas à base de dados PEER NGA-East, atendeu a critérios como conteúdo de frequências, magnitude de momento, distância epicentral e mecanismo focal, de acordo com os resultados da desagregação de ameaça sísmica previamente realizada.

A geração dos registros sísmicos de projeto foi feita com o método de ajuste espectral no domínio do tempo (Al Atik e Abrahamson, 2010). Esse método modifica registros sísmicos reais por meio da adição ou subtração de *wavelets* em trechos da história de aceleração que apresentam discrepâncias entre o espectro de resposta do registro sísmico e o espectro-alvo obtido na análise de ameaça sísmica probabilística. Trata-se de um método recomendado para situações de disponibilidade limitada de registros sísmicos naturais representativos do sítio em estudo. O ajuste espectral foi efetuado para períodos de retorno de 2.500 e 10.000 anos, conforme critérios de segurança definidos em função da classificação de consequências de colapso estabelecida pelas diretrizes internacionais do *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM).

Tabela 3. Registros sísmicos considerados no ajuste espectral para rocha para taxa de excedência 1/2.500.

#	Identificação do terremoto	Ano	Nome da estação	Magnitude	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	V_{S30} (m/s)
1	Saguenay_1988-11-25	1988	US,DCKY	5,85	190,15	192,07	822,1
2							
3	Mineral_2011-08-23	2011	Standing Stone_ PA	5,74	298,58	298,64	940,0
4							
5	Mineral_2011-08-23	2011	Standing Stone_ PA	5,74	298,58	298,64	940,0
6							
7	Mineral_2011-08-23	2011	Blacksburg_ VA	5,74	227,25	227,33	789,0
8							
9	Sparks_2011-11-06	2011	Salina_ OK	5,68	175,43	175,53	799,4

Tabela 4. Registros sísmicos considerados no ajuste espectral para taxa de excedência de 1/10.000.

#	Identificação do terremoto	Ano	Nome da estação	Magnitude	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	V_{S30} (m/s)
1	Saguenay_1988-11-25	1988	US,DCKY	5,85	190,15	192,07	822,1
2							
3	Saguenay_1988-11-25	1988	US,ISFL	5,85	319,53	320,51	866,7
4							
5	Mineral_2011-08-23	2011	Standing Stone_ PA	5,74	298,58	298,64	940
6							
7	Mineral_2011-08-23	2011	Standing Stone_ PA	5,74	298,58	298,64	940
8							
9	Mineral_2011-08-23	2011	Blacksburg_ VA	5,74	227,25	227,33	789
10							
11	Sparks_2011-11-06	2011	Salina_ OK	5,68	175,43	175,53	799,4
12							

A duração efetiva dos registros sísmicos constitui um parâmetro importante, pois influencia diretamente tanto o tempo de processamento computacional quanto a confiabilidade dos resultados obtidos na modelagem numérica. Para a sua definição, adotou-se o critério de Trifunac e Brady (1975), que estabelece a duração efetiva como o intervalo de tempo entre 5% e 95% da Intensidade de Arias, admitindo que a perda de energia do sismo seja inferior a 5%. Com o intuito de conferir maior rigor às análises, esta pesquisa considerou a definição de duração efetiva considerando até 99% da Intensidade de Arias.

Todos os acelerogramas foram submetidos a pré-processamento por meio de filtro passa-banda *Butterworth*, na faixa de frequência de 0,1 Hz a 10 Hz, com o software SeismoSignal (SeismoSoft, 2018).

A Fig. 4 apresenta o processo de ajuste espectral aplicado aos registros sísmicos. Após a aplicação da metodologia, os registros ajustados foram reconstruídos no domínio do tempo (Fig. 5) por meio da Transformada Inversa de Fourier, permitindo a obtenção de acelerogramas compatíveis com o espectro-alvo e preservando as características essenciais do movimento sísmico.

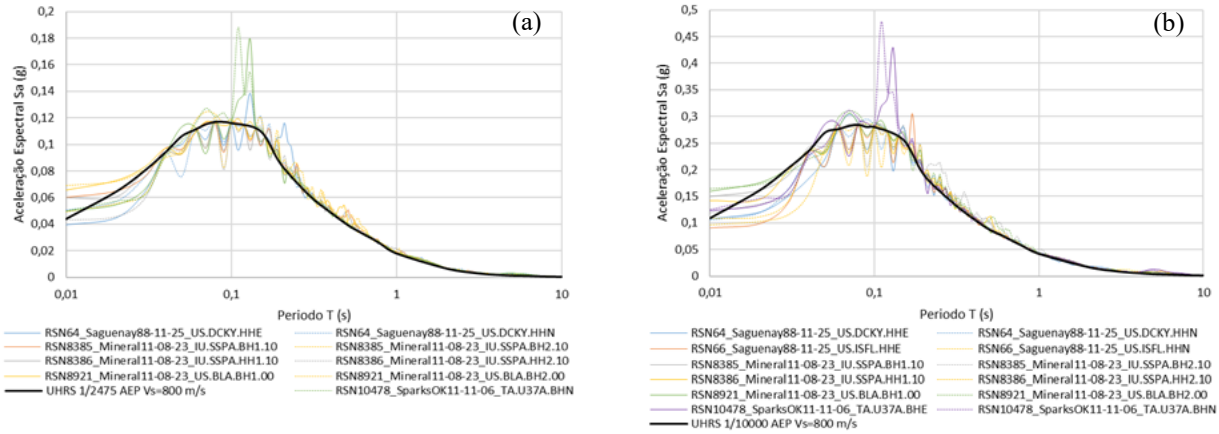


Figura 4. Ajuste espectral de registros sísmicos em relação ao espectro de resposta para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

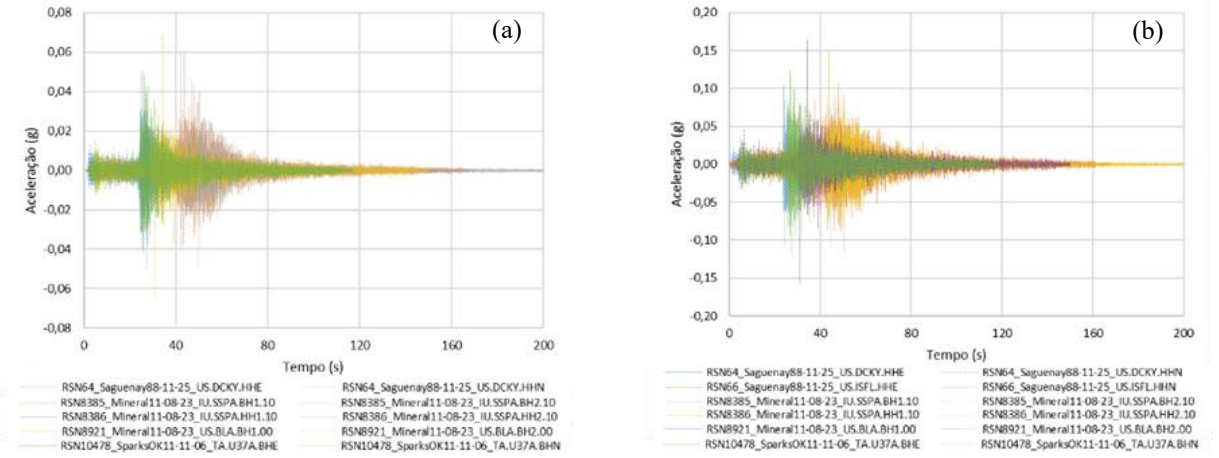
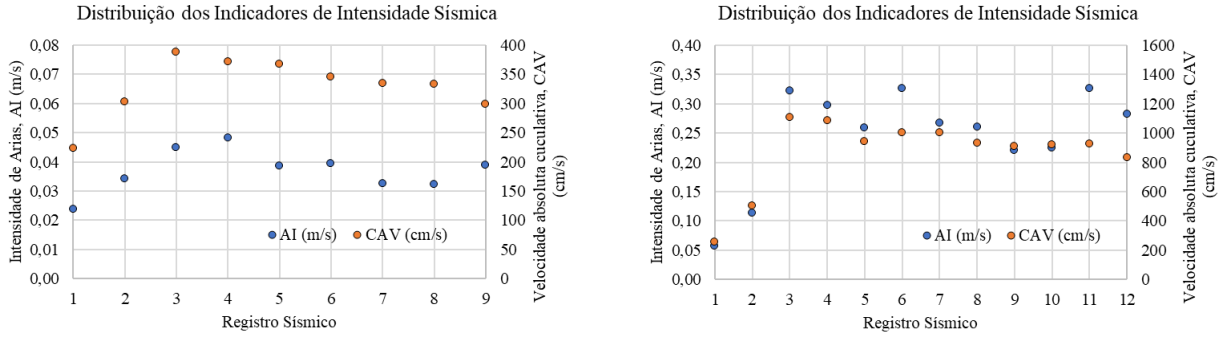


Figura 5. Acelerogramas de projeto ajuste espectral para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

Na obtenção dos registros sísmicos artificiais foram consideradas algumas medidas de intensidade do movimento (IM), selecionadas em função de sua relevância para diferentes mecanismos de resposta. A Intensidade de Arias (AI) é reconhecida como um parâmetro robusto para avaliar deslocamentos sísmicos de encostas, por refletir a energia acumulada durante o movimento sísmico (Bray e Travasarou, 2007), enquanto que a Velocidade Absoluta Acumulada (CAV), especialmente em sua versão modificada CAV5, tem sido utilizada como indicador do gatilho de início de liquefação de solos, por capturar a contribuição de amplitudes repetidas ao longo do registro sísmico (Kramer & Mitchell, 2006). A escolha dessas IMs se justifica pela sua capacidade de relacionar diretamente a intensidade do movimento com potenciais efeitos geotécnicos e estruturais, diferindo de outras medidas que se limitam a quantidades espectrais ou picos isolados. Os valores

de AI e CAV foram determinados para cada registro sísmico, constituindo a base metodológica para a avaliação do desempenho e da resposta estrutural da barragem frente a diferentes condições de carregamento cíclico.



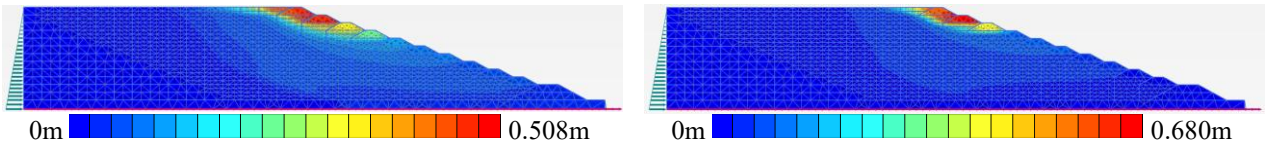
(a) (b)

Figura 6. Medidas de intensidade do movimento dos sismos artificiais para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

4 ABORDAGEM BASEADA EM DESEMPENHO

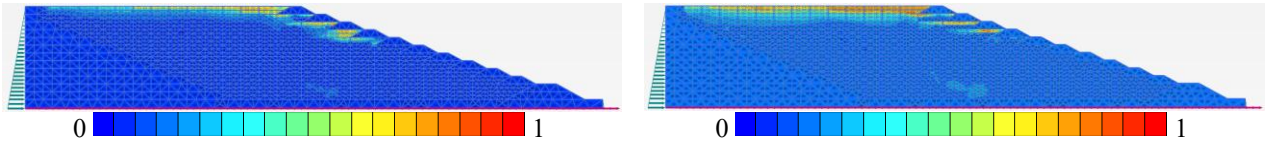
A análise do comportamento sísmico da barragem de rejeitos foi executada com uma abordagem baseada em desempenho, alinhada às diretrizes propostas em estudos de engenharia sísmica e geotécnica (Kramer, 1996; Bray & Travasarou, 2007). Essa abordagem permite avaliar não apenas a resposta estrutural imediata ao carregamento cíclico, mas também os efeitos acumulados que comprometem a estabilidade global da estrutura. Diferentemente de abordagens tradicionais baseadas em critérios de resistência, a avaliação por desempenho busca identificar níveis de resposta aceitáveis em termos de deslocamentos permanentes, deformações plásticas e geração de excessos de poropressão, fornecendo parâmetros diretamente relacionados à segurança operacional da barragem.

Nesse contexto, a Fig. 7 apresenta o campo de deslocamentos permanentes totais, destacando as zonas de maior concentração de deformações induzidas pelo carregamento sísmico. De forma complementar, a Fig. 8 ilustra a distribuição final do parâmetro de poropressão (ru), o que permite identificar regiões com maior potencial de liquefação dinâmica e, consequentemente, maior vulnerabilidade estrutural. A integração desses resultados possibilita uma avaliação abrangente da resposta da barragem, reforçando a importância da abordagem baseada em desempenho como ferramenta para estudos de confiabilidade e mitigação de riscos em obras geotécnicas de grande porte.



(a) (b)

Figura 7. Campo de deslocamentos permanentes totais provocados pelo registro sísmico 1 (Saguenay 1988) para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.



(a) (b)

Figura 8. Distribuição final do parâmetro de poropressão (ru) para o registro sísmico 1 (Saguenay 1988) para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

Os deslocamentos foram avaliados ao longo do talude de jusante, porém a crista do último dique de alteamento foi definida como ponto de controle principal do desempenho estrutural. Essa escolha se fundamenta na necessidade de monitorar a borda livre da barragem, região crítica devido à proximidade de zonas de liquefação dos rejeitos e à ocorrência dos maiores deslocamentos permanentes. A adoção da crista como referência permite correlacionar diretamente os efeitos sísmicos com parâmetros de estabilidade global.

A Fig. 9 apresenta a distribuição dos deslocamentos totais (u) e de suas componentes direcionais (u_x e u_y) na crista da barragem, considerando cenários sísmicos com períodos de retorno de 2.500 e 10.000 anos. Os resultados evidenciam a magnitude e a direção dos deslocamentos permanentes para os diferentes registros sísmicos, permitindo identificar concentrações de deformações e zonas críticas de resposta. Essa análise comparativa entre os dois cenários de ameaça sísmica contribui para a compreensão do comportamento da barragem sob diferentes níveis de carregamento, reforçando a importância da abordagem baseada em desempenho para estudos de confiabilidade e mitigação de riscos em estruturas para contenção de rejeitos.

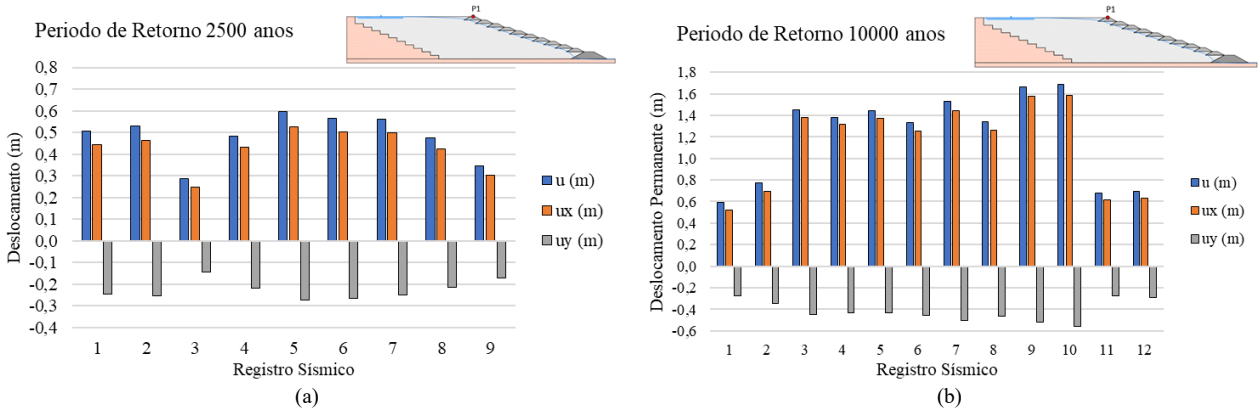


Figura 9. Deslocamentos permanentes totais (u) e componentes direcionais (u_x e u_y) na crista da barragem para períodos de retorno de (a) 2.500 anos e (b) 10.000 anos.

A Fig. 10 apresenta a distribuição dos deslocamentos permanentes totais (u) da barragem para cenários sísmicos com períodos de retorno de 2.500 e 10.000 anos. Os *boxplots* permitem visualizar a variabilidade dos resultados obtidos, destacando valores médios, medianos e extremos, além da dispersão associada a diferentes registros sísmicos considerados. Observa-se que o cenário de 10.000 anos apresenta deslocamentos significativamente maiores, tanto em termos de valores medianos quanto de amplitude, evidenciando maior severidade das condições de carregamento sísmico.

A análise estatística dos deslocamentos fornece subsídios para identificar cenários críticos e estabelecer critérios de segurança mais conservadores, especialmente em contextos de elevado potencial de liquefação e da ocorrência de significativos deslocamentos permanentes.

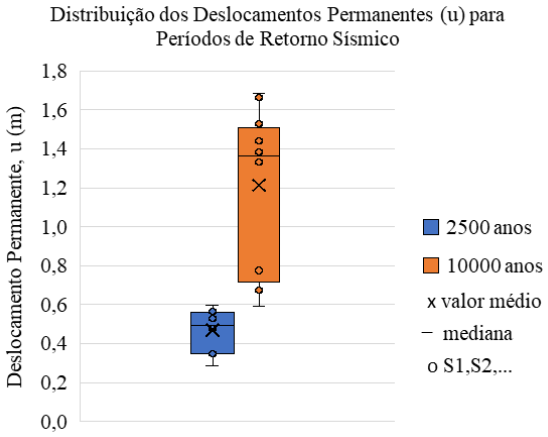


Figura 10. Comparação da distribuição dos deslocamentos permanentes totais na barragem para cenários sísmicos com períodos de retorno de 2.500 e 10.000 anos.

5 CONCLUSÃO

A aplicação da abordagem baseada em desempenho, aliada a técnicas avançadas de modelagem numérica e de caracterização de ameaça sísmica, demonstrou elevada eficácia na avaliação da segurança de barragens de rejeitos. Essa metodologia contribui para o aprimoramento das práticas de gestão de riscos na engenharia geotécnica, fornecendo subsídios técnicos consistentes para tomada de decisões mais fundamentadas.

Os resultados evidenciaram que a adoção de uma metodologia estruturada, baseada na análise probabilística da ameaça sísmica, na geração criteriosa de sismos de projeto e na seleção adequada de modelos constitutivos para simulação do comportamento cíclico de materiais geotécnicos, foi essencial para a previsão do comportamento dinâmico da barragem. Essa abordagem permitiu identificar zonas potencialmente vulneráveis à liquefação dinâmica e à ocorrência de deslocamentos permanentes, aspectos críticos para a estabilidade global da estrutura.

O presente estudo reforça a importância da aplicação de estratégias integradas na engenharia geotécnica, especialmente em regiões de baixa sismicidade como no Brasil, onde o nível de detalhamento técnico é determinante para garantir a confiabilidade de estruturas críticas. A integração entre modelagem avançada, análise probabilística e critérios de desempenho fornece uma base sólida para o diagnóstico e a mitigação de riscos sísmicos, consolidando-se como uma ferramenta indispensável para a segurança e descaracterização de barragens de rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo concedidas aos dois primeiros autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Atik, L., & Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, 26(3), 601-617.

Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, A. K. (2015). *PM4Sand (Version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications*. Center for Geotechnical Modeling Report No. UCD/CGM-15/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, Calif.

Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2018). *PM4Silt (Version 1): A silt plasticity model for earthquake engineering applications*. Report No. UCD/CGM-18/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 108 pp.

Bray, J. D., & Travasarou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 381-392.

Cappellaro, C., Cubrinovski, M., Chiaro, G., Stringer, M.E., Bray, J.D., Riemer, M. F. (2017). Undrained Cyclic Direct Simple Shear Testing of Christchurch Sandy Soils. In: *20th NZGS Geotechnical Symposium*, Wellington, New Zealand, New Zealand Geotechnical Society, pp. 1-8.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Kramer, S. L., & Mitchell, R. A. (2006). Ground motion intensity measures for liquefaction hazard evaluation. *Earthquake Spectra*, 22(2), 413-438.

Kuhlemeyer, R. L.; Lysmer, J. (1973). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Mechanics & Foundation Division*, ASCE, 99(SM5), p. 421-427.

Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(3), 581- 626.

Wijewickreme, D.; Sanin, M.V.; Greenaway, G.R. (2005). Cyclic Shear Response of Fine-grained Mine Tailings. *Canadian geotechnical Journal*, 42, 1408-1421.