

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/17

Análise Dinâmica de uma Barragem de Rejeitos Típica Descomissionada

Wellington Fardin

Mestrando em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil,
welington.fardin@aluno.ufop.edu.br

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro

Diretor, GeoFast T&C Ltda., Ouro Preto, Brasil, saulogft@hotmail.com

RESUMO: Análises dinâmicas ganham cada vez mais espaço na avaliação da resposta sísmica de barragens de rejeitos, uma vez que representam melhor o comportamento dos rejeitos granulares sob carregamentos cíclicos. Este tipo de solicitação é a mesma que ocorre durante um evento sísmico, provocando movimentações do solo, geração de poropressão, e alteração no estado de tensão dos materiais. Além das forças inerciais induzidas que podem levar a estrutura ao colapso, o excesso de poropressão pode atuar como gatilho de liquefação. Faz-se necessária a aplicação de análises que abordem esse comportamento, substituindo ou complementando as análises pseudo-estáticas. No presente trabalho, é desenvolvida uma análise sísmica dinâmica em uma seção típica de barragem para contenção de rejeitos, por meio de modelagem numérica no programa computacional GeoStudio, em seu módulo QUAKE/W. A ação sísmica é caracterizada por meio de um acelerograma artificial, compatível com o espectro de resposta de projeto da NBR 15421:2023. Por fim, é avaliado o fator de segurança obtido no método pseudo-estático e os efeitos produzidos na barragem quando submetida ao carregamento de forma dinâmica. Ao fim do terremoto são indicadas as zonas liquefeitas, sugerindo potenciais regiões de colapso e justificando a relevância do método.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Análise Sísmica, Análise Dinâmica, Barragens de Rejeitos.

ABSTRACT: Dynamic analyses are gaining more and more space in the assessment of the seismic response of tailings dams, as they better represent the behavior of granular tailings under cyclic loading. This type of loading is the same as that which occurs during a seismic event, causing ground movements, generation of pore pressure, and changes in the state of stress of the materials. In addition to the induced inertial forces that can lead the structure to collapse, the excess pore pressure can act as a liquefaction trigger. It is necessary to apply analyzes that address this behavior, replacing or complementing pseudo-static analyses. In the present work, a dynamic seismic analysis is developed in a typical section of a tailings dam, through numerical modeling in the GeoStudio computer program, in its QUAKE/W module. The seismic action is characterized using an artificial accelerogram, compatible with the design response spectrum of NBR 15421:2023. Finally, the safety factor obtained in the pseudo-static method and the effects produced on the dam when subjected to dynamic loading are evaluated. At the end of the earthquake, the liquefied zones are indicated, suggesting potential regions of collapse and justifying the relevance of the method.

KEYWORDS: Numerical Modeling, Seismic Analysis, Dynamic Analysis, Tailings Dams.

1 INTRODUÇÃO

Castilho (2017), explica que os mecanismos de disparo que podem desencadear o processo de liquefação em solos suscetíveis a ocorrência desse fenômeno, geralmente são divididos em gatilhos estáticos e dinâmicos. Enquanto o primeiro grupo refere-se à liquefação estática, devido ao aumento das tensões cisalhantes no solo por carregamentos monotônicos, o segundo está relacionado à liquefação dinâmica e aos carregamentos cíclicos, com os eventos sísmicos sendo os mecanismos mais importantes.

Idriss e Boulanger (2008), explicam que um solo submetido a carregamentos cíclicos com a contínua reversão das tensões cisalhantes é induzido a um comportamento de densificação, resultando em deformação

volumétrica e redução do índice de vazios, desde que em condições drenadas. Se a massa de solo saturada apresentar condições não drenadas, a carga normal que provoca a contração do material é transferida para o fluido (incompressível) presente nos vazios do solo, aumentando sua poropressão.

Solos suscetíveis a apresentarem esse comportamento, como siltes, argilas sensíveis e areias, podem apresentar elevada geração de poropressão quando solicitados por carregamentos cíclicos. O aumento da poropressão pode ocorrer de forma instantânea ao início das solicitações, sendo por vezes inevitável o estabelecimento de condições não drenadas. O resultado entre essa elevação da pressão neutra e o baixo tempo disponível para sua dissipação, pode levar o solo a um excesso significativo de poropressão. Assim, quando esses valores aproximarem-se do estado de tensões efetivas confinantes inicial, o material atingirá seu estado liquefeito.

A resolução da Agência Nacional de Mineração nº. 95 (ANM, 2022), estabelece a necessidade da avaliação dos estudos sísmicos nas barragens de rejeitos brasileiras. Dessa forma, os métodos pseudo-estáticos ganharam espaço devido a sua abordagem direta, mesmo existindo uma grande simplificação na caracterização da ação sísmica. Sua metodologia também não contempla a possibilidade de geração de poropressão e liquefação dinâmica, que são os principais efeitos desencadeados por um terremoto.

Kramer (1996), defende que os efeitos induzidos no solo por terremotos são influenciados diretamente por sua duração, conteúdo de frequências e conjunto de acelerações. Logo, os coeficientes de aceleração unidimensionais e constantes atribuídos nas análises pseudo-estáticas podem não serem representativos do comportamento real do solo quando submetido a este tipo de solicitação. Estudos de Seed (1979), mostraram que algumas barragens que romperam durante terremotos apresentaram fatores de segurança pseudo-estáticos acima de 1,00, não indicando a tendência de ruptura da estrutura.

Por outro lado, as análises dinâmicas ganham espaço e apresentam-se como métodos mais concisos, com a caracterização do sismo geralmente sendo realizada por um histórico de acelerações no tempo (acelerograma). A metodologia por trás desses modelos constitutivos tem como objetivo representar o comportamento não linear do solo quando submetido à solicitações dinâmicas, principalmente contemplando a geração de poropressão e alteração do estado de tensões, caso os materiais possuam essa tendência.

Segundo Kramer (1996), o desenvolvimento de movimentos artificiais de solo é um recurso importante quando não há disponibilidade de registros sísmicos para o local de interesse, ou os registros não são representativos para a sismicidade local. No entanto, há a necessidade dos acelerogramas artificiais serem compatíveis com as condições regionais de estudo, o que torna-se um desafio. Regulamentações voltadas para a segurança de barragens de rejeitos de mineração, orientam o uso do máximo terremoto provável nas avaliações sísmicas, com o tempo de retorno variando conforme potencial de dano da estrutura na possibilidade de rompimento, podendo alcançar até 10 000 anos (CDA, 2013; GISTM, 2020).

Neste trabalho foi realizada a análise sísmica dinâmica de uma barragem de rejeitos hipotética em processo de descaracterização, utilizando o modelo linear equivalente no módulo QUAKE/W do GeoStudio. A ação sísmica foi representada por um sismo artificial compatível com o espectro de resposta de projeto da NBR 15421 (ABNT, 2023), desenvolvido no domínio da frequência pelo método de superposição de ondas senoidais (Gasparini; Vanmarke, 1976).

2 METODOLOGIA

2.1 Desenvolvimento do Sismo Artificial

Conforme NBR 15421 (ABNT, 2023), foi desenvolvido um espectro de resposta de projeto para a zona sísmica 2, sendo adotada uma aceleração sísmica horizontal característica em rocha de 0,07 g. Já a classe de terreno na fundação da barragem, foi estabelecida sendo do tipo C (Rocha alterada ou solo muito rígido). Na Figura 1 é apresentado o espectro de resposta de projeto obtido para uma fração de amortecimento crítico de 5%.

A partir do método de superposição de ondas senoidais (Gasparini; Vanmarke, 1976) e a aplicação da interface gráfica SIMQKE_GR (Gelfi, 2012), desenvolveu-se um sismo artificial compatível com o espectro de resposta da Figura 1 (correspondência mínima de 90 % dos valores espectrais) e com PGA (*Peak Ground Acceleration*) de 0,081 g. Em seguida, aplicou-se um filtro do tipo passa-banda de *Butterworth*, eliminando

possíveis ruídos numéricos com valores além da faixa de frequência geralmente adotada em estudos sísmicos de 0,1 Hz a 15 Hz (Huamán, 2018). Na Figura 2 é ilustrado o sismo artificial desenvolvido.

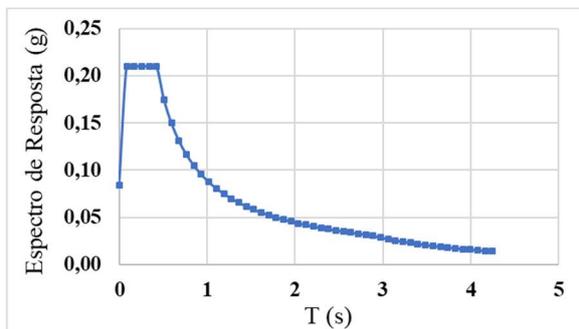


Figura 1. Espectro de resposta de projeto (g).

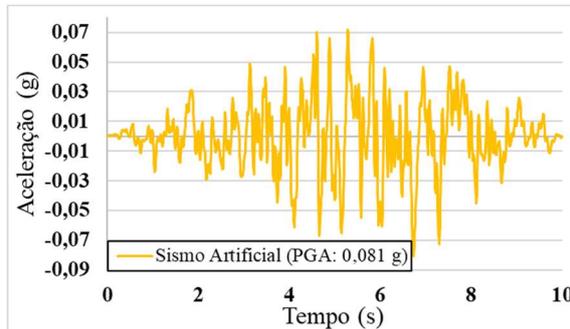


Figura 2. Sismo artificial (PGA 0,084 g).

2.2 Modelagem Numérica

2.2.1 Seção Geológico-Geotécnica

A seção geotécnica adotada neste estudo foi cedida pela GeoFast (2023) e trata-se de um perfil transversal hipotético de uma barragem de rejeitos alteada com *underflow*, pelo método de linha de centro, com o sistema de drenagem sendo composto por um tapete drenante. A seção apresentada na Figura 3 é típica de projetos em processo de descaracterização, possuindo além da berm de reforço, uma camada de rejeito filtrado sobre o reservatório de *overflow*. Os parâmetros geotécnicos básicos são apresentados na Tabela 1.

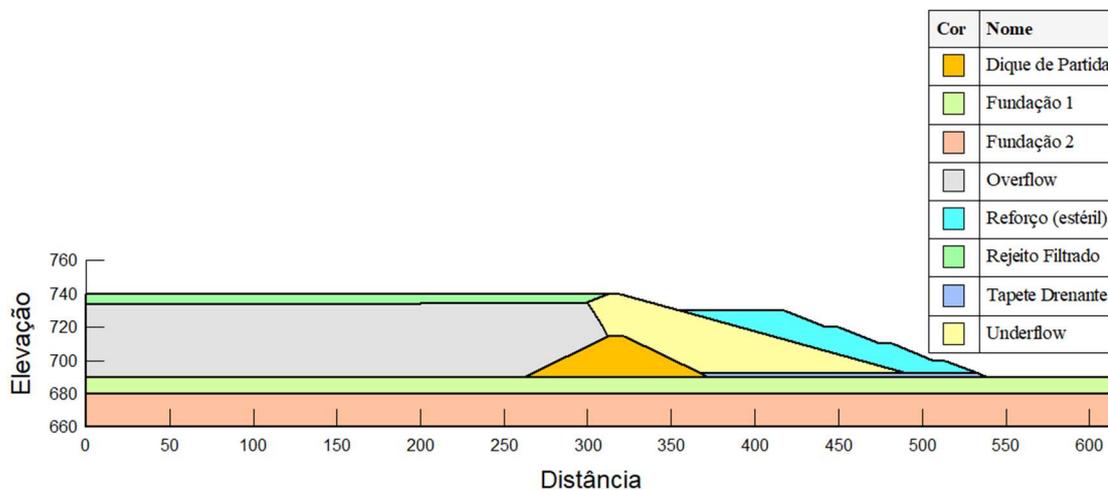


Figura 3 – Seção geológico-geotécnica (GeoFast, 2023).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos básicos (adaptado de Fardin, 2024).

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k_y/k_x	k_x (m/s)	K_0	G_{max} (kPa)
Dique de Partida	20	10	30	0,25	1×10^{-8}	0,5	63 000
Fundação 1	18	10	32	1	1×10^{-8}	0,5	210 000
Fundação 2	20	15	35	1	1×10^{-9}	0,5	315 000
Overflow	20	0	31	0,5	1×10^{-6}	0,7	Figura 7
Reforço (estéril)	18	10	35	0,25	1×10^{-6}	0,5	63 000
Rejeito Filtrado	18	0	32	0,3	3×10^{-6}	0,7	63 000
Tapete Drenante	18	0	35	1	1×10^{-4}	0,5	126 000
Underflow	20	0	33	0,3	3×10^{-6}	0,7	Figura 7

2.2.2 Análise Pseudo-Estática

Realizou-se uma análise de percolação por elementos finitos no módulo SEEP/W do GeoStudio, para definição das poropressões iniciais. Todas as análises posteriores foram acopladas aos resultados desta.

Inicialmente, a estabilidade da estrutura foi avaliada no módulo SLOPE/W por um método pseudo-estático, a partir de uma análise por equilíbrio limite, método de *Morgenstern-Price*. Não foram utilizadas metodologias de minoração do coeficiente de aceleração horizontal. O coeficiente vertical foi definido como 2/3 do horizontal (Newmark; Hall, 1982 *apud* Kramer, 1996). Assim, considerou-se uma carga sísmica horizontal de 0,081 g e uma vertical de 0,054 g, com o sentido contra a gravidade sendo o mais desfavorável.

O modelo constitutivo SHANSEP (*Stress History and Normalized Soil Engineering Properties*) foi utilizado para caracterizar os materiais *underflow* e *overflow* localizados abaixo da linha freática, com uma razão de resistência não drenada de pico de 0,24 e 0,21, respectivamente. Já a busca pela superfície crítica foi definida através da técnica de blocos especificados otimizada, com sua localização sendo forçada a percorrer a região saturada, com mobilização não drenada. Na Figura 4 é ilustrada a superfície de ruptura e o fator de segurança (FS) encontrado de 1,40.

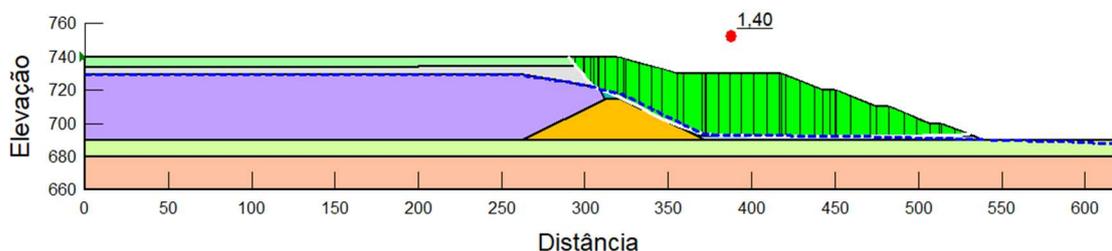


Figura 4. Avaliação sísmica inicial – método pseudo-estático.

2.2.3 Análise Dinâmica Linear Equivalente

No módulo de elementos finitos QUAKE/W, desenvolveu-se uma análise linear equivalente (não calcula deformações permanentes) para avaliar o comportamento dinâmico da barragem. Os materiais com potencial de liquefação e de interesse nesse estudo (*underflow* e *overflow*) foram modelados através do modelo linear equivalente, já os demais foram definidos como linear elástico.

A tensão cisalhante equivalente foi adotada como sendo 65 % da tensão cisalhante máxima e o número de ciclos uniformes considerado igual a 5, correspondendo a um sismo de magnitude 6 (Seed, *et al.*, 1975). O ângulo estimado da superfície de colapso foi aproximadamente 2/3 do ângulo de atrito efetivo (Kramer, 1996), e a resistência em regime permanente nula. A função que modela a geração de poropressão do *overflow* e *underflow*, foi definida conforme os estudos de Lee e Albaisa (1974) e DeAlba, Chan e Seed (1975), representada pela Equação 1. Em que N é o número de ciclos equivalentes, N_L o número de ciclos necessários para a liquefação e α relacionado às propriedades do material e condições do ensaio. A envoltória final está ilustrada na Figura 5.

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{sen}^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right] \quad (1)$$



Figura 5. Função geração de poropressão dos rejeitos para α igual a 0,7.

A envoltória CSR (*Cyclic Stress Ratio*) que modela o número de ciclos necessários para a liquefação em função de uma determinada amplitude cisalhante cíclica, foi estimada com base no material “areia fofa” estudado por Seed e Lee (1965 *apud* Kramer, 1996), correspondendo ao CSR máximo (1 ciclo) igual a 0,15 para o *overflow*. O *underflow* foi normalizado para um CSR máximo de 0,17. Na Figura 6 são ilustradas as funções de número cíclico dos materiais. Já o módulo cisalhante inicial (G_{max}) em função da tensão efetiva média (σ'_m), foi obtido conforme correlação apresentada inicialmente por Kramer (1996) e normalizada para a pressão atmosférica (P_a), conforme apresentado no manual do QUAKE/W (Seequent, 2022). O coeficiente k foi baseado nos estudos de Seed e Idriss (1970) para os materiais “areia fofa” e “areia compacta”. As trajetórias finais são apresentadas na Figura 7.

$$G_{max} = 22k\sqrt{P_a\sigma'_m} \quad (2)$$

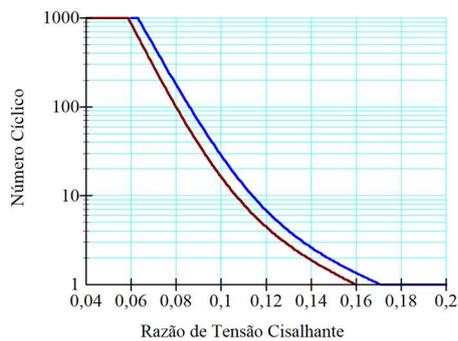


Figura 6. Função número cíclico.

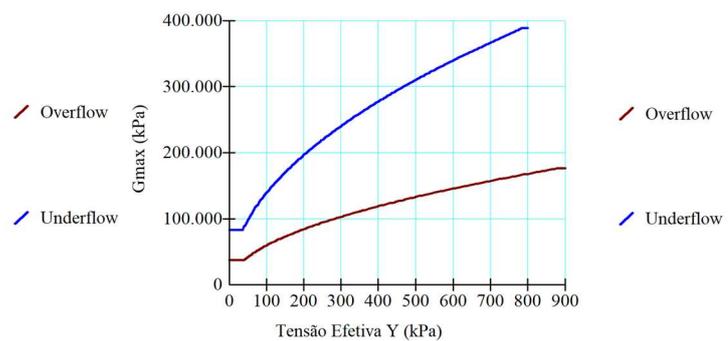


Figura 7. Função G_{max} .

Estudos de Ishibashi e Zhang (1993), possibilitaram representar o comportamento de amolecimento do solo quando solicitado por tensões cíclicas. Na Figura 8 é apresentada a função de redução do módulo cisalhante, e na Figura 9 a relação de amortecimento. Ambos os parâmetros são determinados para materiais com índice de plasticidade igual a zero e posteriormente correlacionados para determinada deformação cisalhante cíclica, calculada pelo elemento finito.

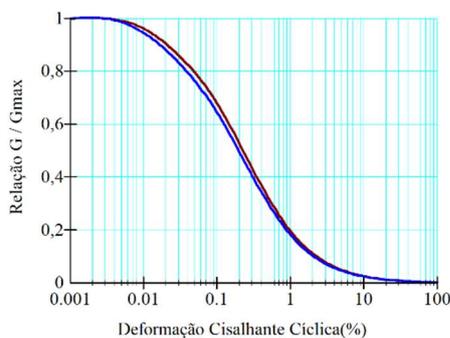


Figura 8. Função de redução G .

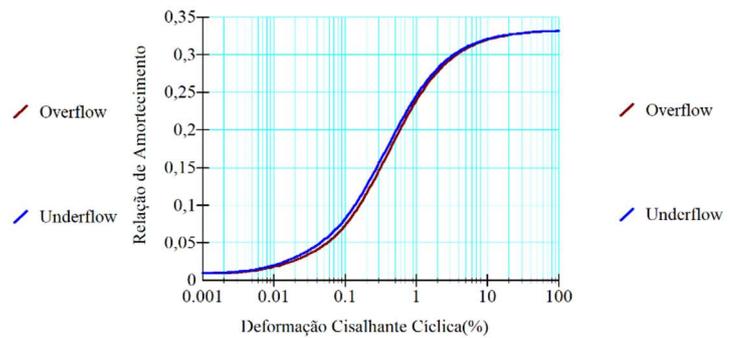


Figura 9. Relação de amortecimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No módulo QUAKE/W foi possível realizar a análise das tensões estáticas iniciais, apresentada na Figura 10, a partir da qual realizou-se a análise dinâmica da estrutura. O carregamento dinâmico provocado pelo sismo resultou em uma forte geração de poropressão nos rejeitos, ilustrada na Figura 11, com alguns pontos apresentando um acréscimo de poropressão da ordem de 400 kPa.

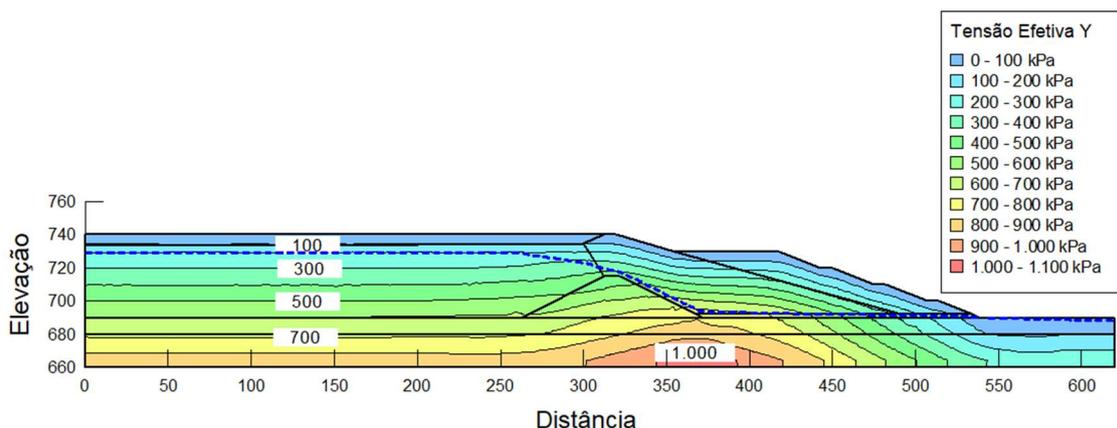


Figura 10. Tensões efetivas verticais iniciais.

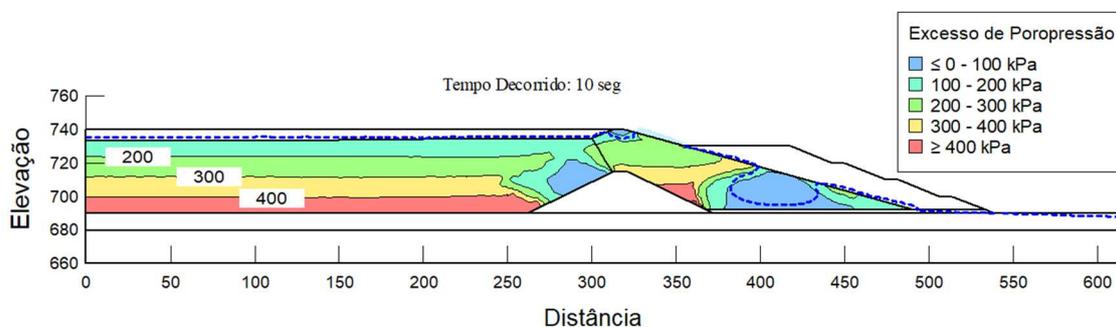


Figura 11. Excesso de poropressão no instante 10 segundos do sismo.

A geração de poropressão ocorreu de forma instantânea e gradativa ao decorrer do sismo. Esse comportamento mostra-se dependente das características geotécnicas dos materiais, além do conjunto de acelerações e frequências com que as movimentações são induzidas pelo terremoto, juntamente ao tempo de exposição da estrutura. Assim, o estado de tensões efetivas iniciais foi alterado com a geração de poropressão, resultando em uma queda expressiva das tensões efetivas nos rejeitos, com alguns pontos alcançando valores nulos. Na Figura 12 são apresentadas as tensões efetivas ao fim do terremoto.

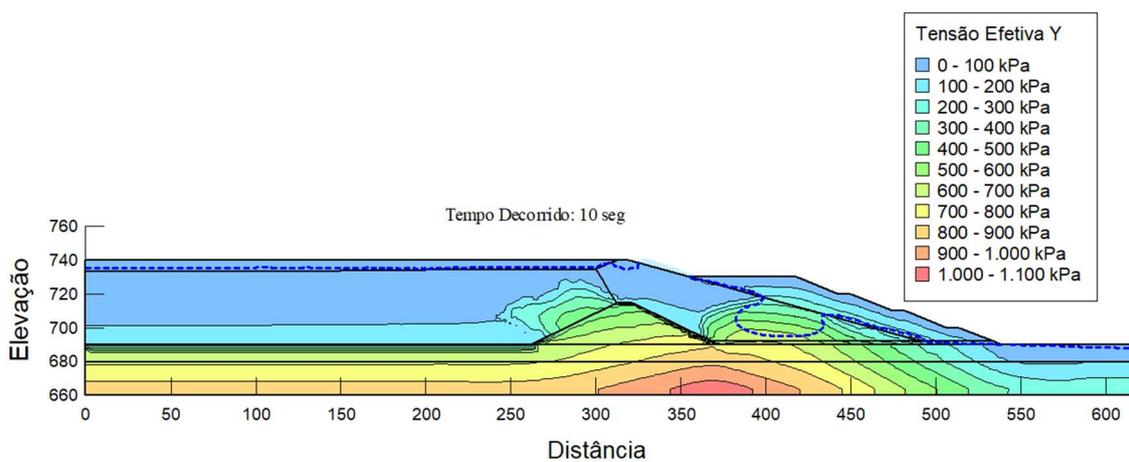


Figura 12. Tensões efetivas após 10 segundos de sismo.

O processo de liquefação dinâmica foi desencadeado em diversas regiões, sendo possível acompanhar a propagação das zonas liquefeitas ao longo do carregamento. Na Figura 13 é ilustrada a progressão e condição final da barragem, na qual praticamente todo o *overflow* e boa parte do *underflow* encontram-se em estado liquefeito.

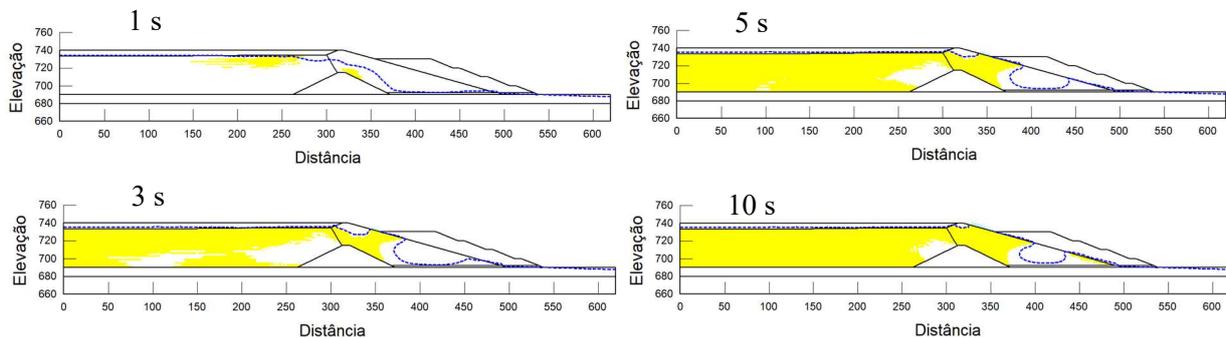


Figura 13. Zonas liquefeitas (em amarelo) no decorrer e final do sismo.

Conforme Kramer (1996), solos com comportamento *strain-softening* apresentam uma redução da resistência ao cisalhamento quando seu valor máximo é alcançado. O pico de resistência pode não ser mobilizado simultaneamente ao longo de toda superfície de ruptura, como abordado nas análises por equilíbrio limite, resultando em uma redistribuição das tensões solicitantes excedentes para as regiões próximas. Essas tensões redistribuídas podem levar outros pontos a alcançarem sua máxima resistência e posteriormente seu estado pós-pico, aumentando a zona de falha e desencadeando um processo de ruptura progressiva.

Kramer (1996), afirma que o fenômeno de ruptura progressiva foi observado em solos com esse tipo de comportamento mesmo quando análises de estabilidade por meio de métodos por equilíbrio limite indicavam fatores de segurança maiores do que 1,00. Entende-se que tais métodos podem não representar a estabilidade real de uma estrutura geotécnica quando parte considerável dos materiais do barramento liquefazem, consequentemente apresentando uma queda brusca de resistência.

Mesmo o método pseudo-estático indicando um FS de 1,40, o que sugere boa estabilidade da estrutura, os resultados da análise dinâmica indicam liquefação plena do *overflow* e de boa parte do *underflow*. Tal condição mostra um grande potencial de colapso da estrutura durante o sismo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Análises pseudo-estáticas apresentam-se como metodologias atrativas, devido ao seu caráter simples e direto na avaliação de estruturas geotécnicas submetidas à solicitações sísmicas. Entretanto, em barragens de rejeitos de mineração, nas quais há a possibilidade de presença de materiais com potencial de geração de poropressão quando submetidos a carregamentos cíclicos, torna-se importante a avaliação do processo de liquefação através de métodos dinâmicos.

Sismos com valores de PGA considerados baixos também podem desencadear problemas geotécnicos, já que os efeitos provocados no solo são influenciados por parâmetros mais complexos, como duração, acelerações induzidas e conteúdo de frequências. Assim, a simplificação da solicitação sísmica em um coeficiente de aceleração unidirecional e constante, como feito em métodos pseudo-estáticos, pode não refletir o real carregamento induzido no solo.

Apesar da indicação de estabilidade obtida com o uso de um método pseudo-estático, há proporções significativas da estrutura que sofrem liquefação quando ela é avaliada pelo método dinâmico. Portanto, percebe-se que o primeiro método de análise apresenta limitações nos casos em que a estrutura for suscetível à liquefação dinâmica.

AGRADECIMENTOS

À Seequent, pela concessão de uso da licença da ferramenta GeoStudio. E à GeoFast, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). NBR 15421. *Projeto de estruturas resistentes a sismos*. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Mineração (2022). *Resolução ANM N° 95*. Brasília, Distrito Federal.
- Castilho, B. D. M. (2017) *Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Nucleo de Geotecnia da Escola de Minas / UFOP. 116 p.
- Canadian Dam Association (2013). CDA. *Dam safety guidelines 2007*.
- Dealba, P., Chan, C. K., Seed, H. B. (1975) *Determination of soil liquefaction characteristics by large-scale laboratory tests*. University of California, Berkeley.
- Fardin, W. (2024) *Análise sísmica dinâmica em barragens de rejeitos com um sismo artificial*. Monografia (Bacharelado). Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Gasparini, D., Vanmarke, E. (1976) *Simulated earthquake motion compatible with prescribed response spectra*. Massachusetts Institute of Technology. 101 p.
- Gelfi, P. (2012) *SIMQKE_GR: Simulation of earthquake*. University of Brescia, Italy.
- GeoFast (2023). Notas de aula: *estudo tensão-deformação em barragens de rejeitos*.
- GISTM. (2020) *Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos*. Global Tailings Review. 42 p.
- Huamán, J. C. (2018) *Previsão numérica do comportamento sísmico da barragem de rejeitos de Alpamarca no Peru*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 172 p.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008) *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California, USA. 264 p.
- Ishibashi, I., Zhang, X. (1993) *Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay*. Soils and Foundations, v.33, n.1, p. 182-191.
- Kramer, S. L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. International Series. New Jersey: Prentice-Hall, p 673.
- Lee, K. L., Albaisa, A. (1974) *Earthquake induced settlements in saturated sands*. Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, v.100, n. GT4.
- Seed, H. B. *et al.* (1975) *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B. (1979) *Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams*. Geotechnique, vol. 29, n. 3, p. 2215-263.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1970) *Soil moduli and damping factors for dynamic*. University of California, Berkeley.
- Seequent. (2022) *Dynamic Earthquake - Modeling with GeoStudio*. Seequent limited, the Bentley subsurface company. p. 179.