

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/15

Análise de Segurança devido a Anomalias em Barragem de Terra para Contenção de Rejeito

Darym Júnior Ferrari de Campos

Engenheiro geotécnico, Progen S.A., Brasília-DF, Brasil, darymjuniorgmail.com

Thiago Luiz Coelho Morandini

Professor, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil, thiagomorandini@cefetmg.br

Denis Duda Costa

Engenheiro geotécnico, Progen S.A., Belo Horizonte-MG, Brasil, denis.costa@progen.com.br

Francisco Rodrigues

Engenheiro geotécnico, Progen S.A., Belo Horizonte-MG, Brasil, francisco.rodrigues@progen.com.br

Fernanda Rocha Reis Sol

Engenheira geotécnica, Vale S.A., Belo Horizonte-MG, Brasil, fernanda.sol@vale.com

Paulo Cesar Riquelme Gomide

Engenheiro geotécnico, Vale S.A., Belo Horizonte-MG, Brasil, paulo.cesar.gomide@vale.com

RESUMO: As avaliações de segurança das barragens sujeitam-se a incertezas inerentes a variabilidade das propriedades naturais e eventos que podem ocorrer, além do conhecimento inadequado de parâmetros e relações entre valores de entradas e saídas. Neste trabalho apresentam-se os resultados de simulações numéricas de anomalias, como trinca, erosão e surgência, normalmente encontradas em inspeções de segurança para medição do impacto no fator de segurança das barragens a jusante. O artigo limitou-se a simulações numéricas de três tipos de barragens de terra para contenções de rejeito, variando-se os parâmetros de resistência do aterro e dos rejeitos, acrescentando diferentes magnitudes de anomalias de taludes a jusante. Totalizou-se um espaço amostral de 162 análises. De acordo com os resultados, ocorrem reduções médias na análise de segurança variando-se entre 4% a 9% para as simulações de anomalias que tratam da erosão, entre 3% a 25% para a surgência e entre 12% a 25% para as trincas. Ainda, foi verificado o efeito combinado das anomalias, mostrando o impacto na redução do intervalo de segurança. Por fim, conclui-se que as anomalias simuladas são variáveis importantes a serem avaliadas em inspeções, não só para demonstrar desvios na operação e manutenção das estruturas, mas também pela redução do fator de segurança de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Anomalias, Trincas, Erosão, Surgência, Fator de Segurança.

ABSTRACT: Safety evaluations of dams are subject to uncertainties inherent to the variability of natural properties and events that may occur, as well as inadequate knowledge of parameters and relationships between input and output values. This work presents the results of numerical simulations of anomalies, such as cracks, erosion, and upwelling, commonly found in safety inspections to measure the impact on the safety factor of downstream dams. The article was limited to numerical simulations of three types of earth dams for tailings containment, varying the parameters of embankment and tailings resistance, adding different magnitudes of downstream slope anomalies. A sample space of 162 analyses was totaled. According to the results, average reductions in safety analysis range from 4% to 9% for erosion simulations, from 3% to 25% for upwelling, and from 12% to 25% for cracks. Furthermore, the combined effect of anomalies was verified, showing the impact on reducing the safety interval. Finally, it is concluded that simulated anomalies are important variables to be evaluated in inspections, not only to demonstrate deviations in the operation and maintenance of structures but also due to the reduction of the design safety factor.

KEYWORDS: Anomalies, Cracks, Erosion, Upwelling, Safety Factor.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeito começaram a ser construídas no Brasil em meados da década de 1930, sendo fundamentais para o armazenamento de resíduos provenientes da lavra de mineração, evitando contaminação do ambiente e controlando a qualidade de efluentes a jusante. Porém, há muitas críticas relacionadas aos impactos sociais e ambientais, destacando-se ainda os aspectos ligados à segurança, como os riscos associados à construção e operação das barragens.

Oliveira (2010) menciona que ao longo do tempo de vida útil de uma barragem de terra podem surgir diversos tipos de anomalias, podendo ser capazes de impactar negativamente no desempenho do barramento e de suas demais estruturas, resultando até mesmo em um rompimento ou galgamento da barragem, caso não sejam identificadas e tratadas a tempo, trazendo riscos às populações localizadas no seu entorno. Jansen (1983) afirma que o risco de falha de barragens é um dos pesos inevitáveis que a humanidade deve carregar, mas que os programas de avaliação de segurança para as barragens são de vital importância. O constante avanço na tecnologia de construção de barragens, especialmente no entendimento do comportamento dos materiais, colaboram para que as barragens existentes possam ser melhores avaliadas e para que progressivamente as novas barragens não venham a entrar em colapso.

Neste contexto, o presente artigo apresenta os resultados de simulações de erosão, surgência (variação do nível freático no maciço) e trinca em barragens tipo com propósito de estabelecer a influência dessas anomalias sobre o fator de segurança (FS) do talude a montante de barragens de forma determinística. As simulações foram realizadas para modelos de barragens alteadas a jusante pelo método determinístico por equilíbrio limite. Ao fim, o estudo se propôs em determinar um valor médio de redução de segurança devido às anomalias citadas, de modo a estabelecer uma forma de análise em portfólio ou de fonte de calibração dos métodos de análises em portfólio existentes para que possa auxiliar gestores de barragens na garantia e confiabilidade da estabilidade dessas estruturas.

2 AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA NAS BARRAGENS

Barragens existentes devem ser reavaliadas periodicamente a fim de se assegurar que elas estejam em condições seguras, de acordo com os padrões de segurança vigentes na data de avaliação. O propósito da avaliação de segurança é determinar o status da barragem no que diz respeito a sua estrutura e segurança operacional. A avaliação deve identificar problemas e recomendar tanto medidas remediadoras, restrições operacionais e/ou modificações, ou análises de estudos para a solução dos problemas. Estudos recentes têm proposto diferentes métodos de avaliação de segurança em barragens de rejeito, assim como evoluções nestes métodos, tais como Bowles (2000), Fell et al. (2000), Hartford and Baecher (2004), ICOLD (2009), Jeon et al. (2009), Schultz et al (2010), Zhang et al. (2016), Morgenstern (2018) e Lumbroso et al. (2021).

Pode-se citar como métodos de avaliação de segurança em barragens:

- Métodos de análise de risco: são estabelecidas probabilidades de ruptura versus consequências para um dado modo de ruptura avaliado. Os possíveis gatilhos de ruptura são apontados como eficaz, assim como pontos vulneráveis de uma estrutura, mas não retorna um número de segurança global;
- Métodos determinísticos: calcula-se um fator de segurança para o cenário avaliado. As incertezas são tratadas de forma implícita pelas normas e manuais de referência, retornando um fator de segurança para cada modo de falha (talude jusante, talude montante, fundação, liquefação etc). No entanto, só retorna um fator de segurança real se todos parâmetros de entrada forem levantados com precisão;
- Métodos de análise em portfólio, onde a condição atual da barragem é comparada à situação ideal de projeto por meio de inspeção e auditoria. As análises mensuram anomalias identificadas em campo, porém os pesos atribuídos dependem do método adotado, assim como depende da interpretação/expertise do avaliador.

3 ANOMALIAS

A Resolução nº 95 (ANM, 2022) caracteriza anomalia como “qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou mau funcionamento que possa vir a afetar a segurança da barragem”. Anomalias podem surgir durante o tempo de vida útil de uma barragem de terra, afetando fundação, maciço, sistema de drenagem interna e superficial da barragem etc, sendo geralmente atribuídas às falhas de projeto, construção, erros em

processos de operação e inclusive a falta de conservação das próprias estruturas. Esse trabalho levou em conta três anomalias recorrentes que podem evoluir e afetar o funcionamento seguro do barramento de terra.

A primeira delas, a erosão, segundo Fell et al. (2008), consiste no desprendimento, desgaste, transporte e sedimentação de partículas de solo em virtude da atuação de forças causadas pelo fluxo de água. Os tipos de erosão e possíveis consequências podem ser vistas pelos mesmos autores. Outra anomalia recorrente é a surgência, mencionada pela ANA (2017) como a ocorrência de água, por percolação, na face do paramento de jusante da barragem, ou nas ombreiras, em local não previsto pelo projeto. Por fim, a última anomalia tratada para fins de estudo é a trinca, normalmente provocadas por deformações excessivas e, principalmente, diferenciais dentro do aterro das barragens, levando a estrutura ao risco.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelos Utilizados

Esse trabalho se propôs a avaliar como as anomalias, mencionadas no item 3, afetam quantitativamente a segurança de barragens por meio de simulações em modelos de barragens tipo. A magnitude da anomalia foi realizada por meio do comparativo entre os FS de uma mesma seção e dos mesmos parâmetros geotécnicos, minimizando, assim, a interferência do perfil analisado em termos de geometria (altura e inclinação) dos taludes. Para as avaliações de segurança das barragens proporem-se modelos de estruturas de pequeno, médio e grande porte, todas alteadas à jusante. A Figura 1 mostra a seção tipo das barragens alteadas à jusante de pequeno, médio e grande porte utilizadas para as simulações, denominadas B1, B2 e B3, respectivamente.

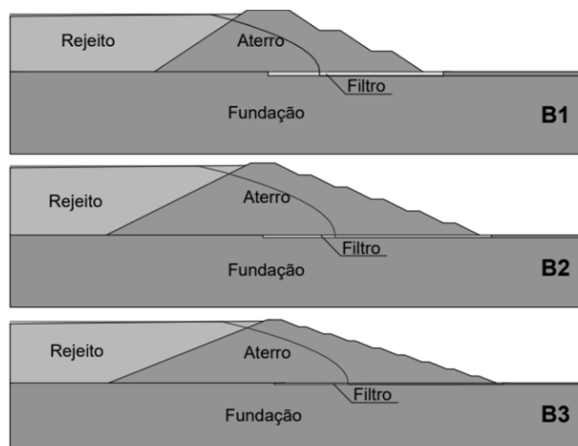


Figura 1. Seção tipo das barragens de terra empregadas.

Os parâmetros geotécnicos foram selecionados visando representar características de resistência tipicamente encontrados nas barragens brasileiras. Escolheu-se um rejeito com comportamento tipicamente não drenado, ou seja, resistência não-drenada. De modo a se obter uma variabilidade de modelos analisados, os parâmetros de ângulo de atrito do aterro e resistência não-drenada do rejeito foram alterados em 4 valores inferiores e superiores de modo que cada modelo analisado (B1 a B3) representassem 18 barragens, totalizando um universo de 54 barragens simuladas.

As características geométricas das barragens B1, B2 e B3 são apresentadas na Tabela 1. Já os parâmetros geotécnicos dos materiais empregados nas simulações encontram-se na Tabela 2. Vale destacar que, com exceção do rejeito, os demais parâmetros dos materiais são considerados como efetivos.

Tabela 1. Características geométricas dos modelos empregados nas análises.

Barragem	Altura (m)	Inclinação do talude (V:H)	Largura das bermas (m)	Método de alteamento
B1	15	1:1,5	5	Jusante
B2	30	1:2,0	5	Jusante
B3	45	1:2,5	5	Jusante

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos empregados nos modelos analisados.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito	Resistência não-drenada (kPa)
Fundação	20	10	32°	-
Aterro	18	10	26° ± 8°	-
Rejeito	16	-	0°	(20±8) kPa + 4 kPa/m
Lastro	16	10	20°	-
Filtro	18	0	30°	-

4.2 Métodos de Análises

As análises de estabilidade dos modelos propostos foram realizadas por meio do cálculo do FS do talude de montante empregando-se o *software Slide 6.00*®. Foram consideradas análises sem presença de anomalias, o que é considerado como ideal nos projetos, assim como análises simulando erosão, surgência e trinca de pequeno, médio e grande porte, também denominadas como magnitudes 1, 2 e 3, respectivamente. Para as simulações, considerou-se as características para cada magnitude de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Características geométricas dos modelos empregados nas análises.

Magnitude	Erosão	Surgência	Trincas
1	Isolada, superficial, localizada em uma berma da seção	Base da estrutura, nível de água normal próximo ao centro da barragem	Crista da barragem, profundidade de até 5% da altura
2	Variada, até 2m de profundidade, localizada em até dois lados da seção	Acima da primeira berma, nível de água ligeiramente elevado próximo ao centro da barragem	Crista ou reservatório, profundidade de até 10% da altura
3	Variada, até 4m de profundidade, com erosões em várias camadas de bermas da seção	Acima da segunda berma, nível de água consideravelmente elevado próximo ao centro da barragem	Crista ou reservatório, profundidade de até 25% da altura

A título de exemplificação, a Figura 2a ilustra o modelo B2 a partir de uma das simulações numéricas considerando a condição de operação normal (sem presença de anomalias) e na Figura 2b com a presença

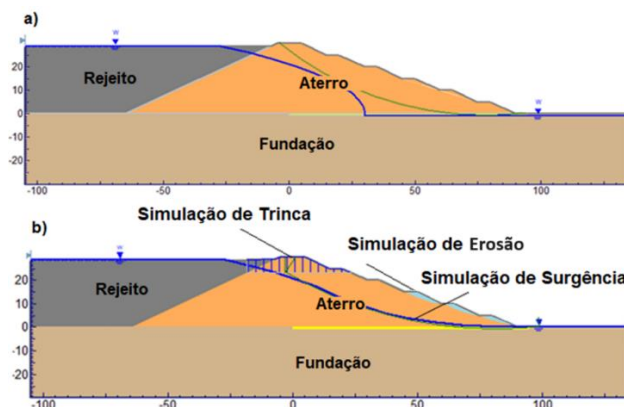


Figura 2. a) Exemplo de simulação sem anomalias; b) simulação com as três anomalias. (modelo B2).

Na implementação do método procedeu-se a análise prévia para definição das seções e parâmetros geotécnicos da condição ideal de projeto, simulando variações dos parâmetros de aterro e rejeitos, assim como o cálculo do FS para as condições de anomalias. Além disso, o FS foi calculado para combinações de erosão, surgência e trinca sempre com a mesma magnitude para verificar o efeito combinado e a hipótese de validade da sobreposição dos efeitos. A comparação entre o FS da condição de projeto e a condição de anomalia foi feita fixando os parâmetros geotécnicos para que não interferissem nos resultados.

Adotaram-se como premissas nas análises de estabilidade o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, superfícies circulares de ruptura e o método de análise de Morgenstern-Price que satisfaz, simultaneamente, o equilíbrio de forças e momentos entre fatias.

Finalmente, para o cálculo da perda de segurança nos modelos analisados devido à presença das anomalias, empregou-se da definição de margem de segurança presente em Schultz et al. (2010), o qual R representa as forças de resistência e C as forças de carregamento, conforme a Equação 1. Sabendo que o FS é definido pela razão entre R e C , conforme a Equação 2, define-se MS em função de FS.

$$MS = \frac{R - C}{C} \quad (1)$$

$$FS = \frac{R}{C} \rightarrow MS = FS - 1 \quad (2)$$

A magnitude relativa ao efeito das anomalias foi determinada calculando-se a perda relativa de margem de segurança (ΔMS), conforme Equação 3, dado pela diferença entre o FS inicial do projeto (FS_0) e o FS contendo alguma anomalia (FS_A).

$$\Delta MS = \frac{FS_0 - FS_A}{MS} \quad (3)$$

Considerando que o FS_A é a própria condição real de segurança de uma barragem (CRS), define-se CRS calculado por FS_0 , MS e ΔMS , conforme as Equações 4 e 5.

$$CRS = FS_0 - MS \cdot \Delta MS \quad (4)$$

$$CRS = FS_0 - MS \sum \Delta MS \quad (5)$$

Vale destacar que a Equação 5 será válida apenas se o efeito da superposição dos efeitos de anomalias sobre a MS for verificado. Dessa forma, o efeito de duas ou três anomalias poderá ser representado pelo somatório de ΔMS .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações para avaliação da influência das anomalias de pequena, média e grande magnitude para as barragens B1, B2 e B3, sobre a segurança de barragens em termos de ΔMS , são ilustrados nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente. Em geral, os resultados apresentaram uma redução na segurança proporcional à magnitude das anomalias simuladas. Houve pouca variação em relação à média (a maioria das análises estava dentro dos limites do desvio padrão), sugerindo que as anomalias têm uma redução relativamente uniforme na segurança das barragens, independentemente de seu tamanho e tipo de elevação. As Figuras 3, 4 e 5 mostram o resultados para os casos de erosão, surgência e trinca, respectivamente.

As simulações consideraram os materiais como uniformes e homogêneos. Entretanto, em casos reais, o tamanho da barragem com maior susceptibilidade à heterogeneidade pode resultar em um aumento na incerteza e variabilidade dos parâmetros.

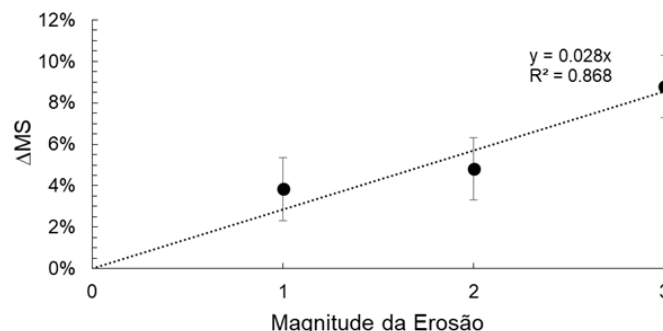


Figura 3. Variação ΔMS em função da magnitude – Ajuste linear dos resultados da simulação para erosão

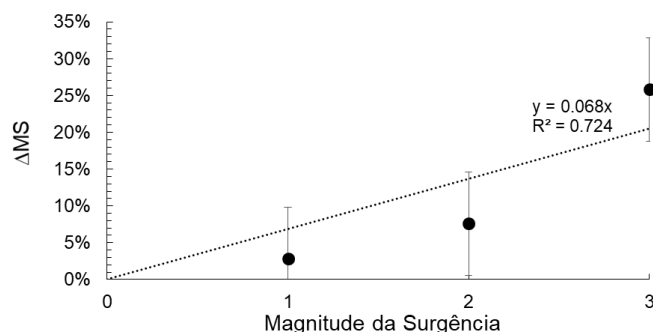


Figura 4. Variação ΔMS em função da magnitude - Ajuste linear dos resultados da simulação para surgência

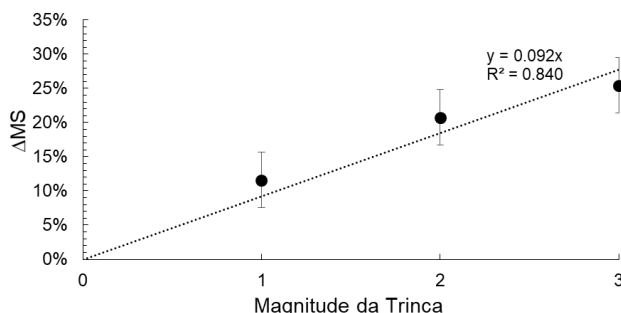


Figura 5. Variação ΔMS em função da magnitude – Ajuste linear dos resultados da simulação para trinca

Conforme as Figuras apresentadas, a erosão de magnitude 1 resultou em ΔMS de ~4%, a erosão de magnitude 2 em ~5%, e a erosão de magnitude 3 em ~9%. Quanto às surgências, observou-se que a de magnitude 1 resultou em ΔMS de ~3%, a magnitude 2 em ~8% e para a magnitude 3 teve-se ~25%. Quanto às análises de trinca, observou-se o resultado em ΔMS de ~12% para a magnitude 1, ~21% para a magnitude 2 e ~25% para magnitude 3. Os resultados foram coerentes tanto na variação do atrito do aterro quanto na variação dos parâmetros de resistência dos rejeitos.

Ao analisar as possíveis diferenças entre os resultados da simulação, as superfícies de escorregamento não seguiram uma regra, mas foram bastante variadas tanto em profundidade quanto em localização. Esse comportamento era esperado devido à grande variação nos parâmetros geotécnicos e anomalias. De qualquer forma, apesar dessa variação na superfície de escorregamento, foi observada uma tendência linear relativa dos resultados.

O ajuste linear no gráfico para a avaliação da erosão (Figura 3) obteve um coeficiente de determinação de 87% e um desvio padrão de $\pm 2,3\%$ para a amostra de campo avaliada, indicando um modelo linear satisfatório entre a magnitude da erosão e a perda relativa de segurança da barragem. Da mesma forma, pode-se observar nas Figuras 4 e 5 bons ajustes lineares para os gráficos das anomalias de surgência e trinca. Verificou-se respectivamente um coeficiente de determinação de 72% e um desvio padrão de $\pm 5,5\%$, e um coeficiente de determinação de 84% e um desvio padrão de $\pm 2,1\%$.

Comparando as anomalias simuladas, pode-se inferir a partir dos resultados obtidos que a surgência e a trinca têm uma maior redução na segurança em comparação com a erosão. No entanto, pode-se afirmar que nenhuma das anomalias simuladas pode ser negligenciada, com resultados que podem atingir uma redução de até 25% na margem de segurança. Exemplificando-se, uma barragem com um FS de projeto de 1,5 apresentando uma surgência de magnitude 3, com $\Delta MS = 25\% \pm 5,5\%$, teria esse FS reduzido para uma faixa entre 1,35 e 1,40. Além disso, esse resultado poderia ser ainda mais significativo para o caso de verificação de mais de uma anomalia.

Além das simulações das anomalias analisadas isoladamente, combinações de anomalias também foram avaliadas neste trabalho para verificar a redução na segurança e a validação do efeito de sobreposição dos efeitos. A Figura 6 ilustra os resultados da compatibilidade entre erosão e surgência, erosão e trinca, e trinca e surgência, respectivamente.

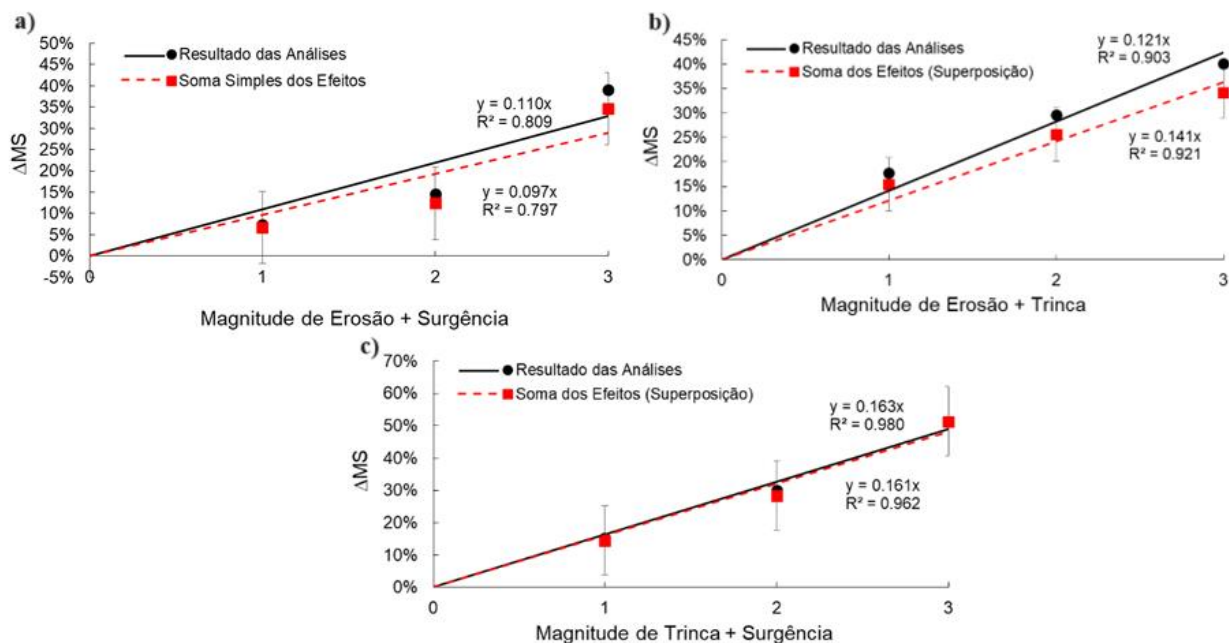


Figura 6. Variação de ΔMS em função da magnitude – Ajuste linear dos resultados para: a) erosão + surgência; b) erosão + trinca; e c) trinca + surgência

Conforme esperado, o efeito combinado das anomalias aumentou o ΔMS para todas as análises e magnitudes simuladas, tanto para avaliações de modelo isolado quanto em termos de média. Uma proporcionalidade é vista nos ajustes lineares na Figura 6 entre a magnitude combinada das anomalias e a perda relativa da margem de segurança. As análises da combinação de erosão + surgência (Figura 6a) retornaram ΔMS de ~8% para magnitude 1, ~15% para magnitude 2 e ~39% para magnitude 3. Para a combinação de erosão + trinca (Figura 6b), foi observado um ΔMS de ~15% para magnitude 1, ~30% para magnitude 2 e ~40% para magnitude 3. Por último, observa-se na Figura 6c, combinação de trinca + surgência, resultando em um ΔMS de ~15% para magnitude 1, ~30% para magnitudes 2 e ~51% para magnitudes 3.

Os valores do coeficiente de determinação variaram entre 80% e 98% considerando o desvio padrão apresentado. Este resultado mostra que as anomalias combinadas podem se somar ao efeito da redução da segurança, especialmente se essas anomalias forem identificadas na mesma seção da barragem. Assim, deve-se atentar às investigações apenas isoladas durante uma inspeção, pois pode não estar retratando a realidade.

Observando-se atentamente a Figura 6b, apesar do bom ajuste linear para a combinação das anomalias, o efeito tende a diminuir para a magnitude mais elevada, ficando claro o último ponto abaixo da linha de tendência. Isso pode ser explicado pelo fato de que a erosão e a trinca são anomalias que mudam a geometria, e para magnitudes elevadas, a erosão pode interferir na área das trincas ou vice-versa. Há uma possível mudança sutil da superfície de escorregamento entre uma análise e outra. Comparando-se com os gráficos das Figuras 6ac, esta observação não foi verificada, mostrando o ponto acima da linha de tendência para as magnitudes 3, retratando o efeito potencial da surgência sobre as anomalias que alteram a geometria da seção.

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que é possível avaliar a condição real de segurança das barragens medindo as anomalias. No entanto, para esse fim, os resultados deste estudo devem ser complementados com avaliações de outras condições de contorno, como análises de tensão-deformação, bem como a avaliação de outros modos de falha que podem reduzir a segurança de uma barragem.

6 CONCLUSÕES

A partir da metodologia de pesquisa e dos resultados observados, foi demonstrado que é possível avaliar o efeito de redução de fator de segurança em barragens de terra para contenção de rejeito devido a anomalias, como erosão, surgência e trinca, por meio de simulações em softwares computacionais em modelos de barragens tipo. De acordo com as simulações, observou-se uma redução na segurança proporcional à magnitude das anomalias simuladas para todas as anomalias testadas, bem como uma tendência linear de redução na segurança com o aumento da magnitude da anomalia.

Em termos de efeitos na redução da margem de segurança, a surgência teve o percentual mais significativo a cada nível de magnitude, indo de ~3% até ~25%. Na sequência temos as trincas, de ~12% a ~25%. Já o menor efeito deu-se pela erosão, com a magnitude 1 iniciando em ~4%, chegando em ~9% na magnitude 3. Dessa forma, quando as anomalias são avaliadas separadamente, a redução na segurança pode chegar a 25%, indicando uma grande diminuição no fator de segurança de projeto de uma barragem.

O efeito combinado das anomalias demonstrou que a superposição dos efeitos é válida. Esta descoberta demonstra que a redução na segurança pode ser obtida adicionando o efeito das anomalias avaliadas separadamente dentro de um erro aceitável. Nas análises apresentadas, o efeito da avaliação combinada foi menor para as análises contendo erosão, e o pior cenário em termos de redução de segurança foi obtido para as combinações de trinca + surgência. Por fim, demonstrou-se que é possível medir a redução da segurança de uma barragem a partir do levantamento de anomalias rotineiramente realizadas durante inspeções e auditorias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Vale S/A pela oportunidade e apoio destinado a pesquisa científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA – Agência Nacional de Águas (2017). Relatório de segurança de barragens 2016. ANA, Brasília, 84 p.
- ANM – Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução Nº 95, de 7 de Fevereiro de 2022: Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. ANM, Brasília, DF, 49 p.
- Bowles, D.S. (2000). Advances in the practice and use of portfolio risk assessment. In: Proceedings of the 2000 Australian Committee on Large Dams – ANCOLD, pp. 1-12, Queensland, Australia.
- Fell, R.; Bowles, D.S.; Anderson L.R.; Bel, G. (2000). The status of methods for estimation of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment. In: Proceedings of 20th International Congress on Large Dams, Beijing, China. Anais, 20th International Congress on Large Dams.
- Fell, R.; Foster, M.; Cyganiewicz, J.; Sills, G.; Vroman, N.; Davidson, R. (2008). Risk Analysis for Dam Safety: A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping. Draft Guidance Document. 533p.
- Hartford, D.N.D.; Baecher, G.B. (2004). Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford Ltd, London. 391 p.
- ICOLD – International Commission on Large Dams (2009). Dam safety management. In: Proceedings of 23rd International Congress on Large Dams, Brasília, Brazil. Anais, 23rd International Congress on Large Dams.
- Jansen, R. B., Dams and Public Safety, A Water Resources Technical Paper, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, EUA, 1983.
- Jeon, J.; Lee, J.; Shin, D.; Park, H. (2009). Development of dam safety management system. Advances in Engineering Software, 40 (1): 554-563.
- Lumbroso, D.; Davison, M.; Body, R.; Petkovšek, G. (2021) Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 21–37.
- Morgenstern, N.R. (2018). Geotechnical Risk, Regulation, and Public Policy. Soils & Rocks, 41(2): 107-129.
- Oliveira, J. B. V. R. Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens. (2010). Dissertação de Mestrado em Geotecnia Aplicada à Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 149 p.
- Schultz, M.T. Gouldby, B.P.; Simm, J.D.; Wibowo, J.L. (2010). Beyond the factor of safety: Developing fragility curves to characterize system reliability. Technical Report: ERDC SR 10-1. U.S. Army Corps of Engineers, Washington.
- Zhang, L.; Peng, M.; Chang D.; Xu Y. (2016). Dam failure mechanisms and risk assessment. John Wiley & Sons, Singapore, 476 p.