

INFLUÊNCIA DE SURGÊNCIAS NA SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Thiago Luiz Coelho Morandini¹; Weber Anselmo dos Ramos Souza²

Resumo – Os casos recentes de rupturas de barragens de rejeito impõe avanços constantes nas técnicas de avaliação de segurança destas estruturas ao redor do mundo. A análise em portfólio é considerada uma técnica de avaliação rotineira para garantia de segurança de barragens, entretanto sua aplicação é subjetiva e dependente da expertise do avaliador. Neste sentido, este artigo apresenta os resultados da avaliação da influência de surgências no fator de segurança de barragens de rejeito com o objetivo de diminuir a subjetividade nas análises em portfólio. Este artigo realizou simulações numéricas de três barragens alteadas à jusante e duas barragens alteadas à montante, com variação de parâmetros de resistência do aterro e do rejeito para três tipos de surgências (pequena, média e grande magnitude) por meio de elevação nível d'água no aterro, totalizando um espaço amostral de 270 análises. Os resultados evidenciam que houveram reduções médias na margem de segurança de 8%, 15% e 25% para as surgências de pequena, média e grande magnitude, respectivamente. O desvio padrão amostral das análises variou entre 8-12%. Foi observado também que para as duas surgências de menor magnitude, as barragens à montante tiveram variações dos fatores de segurança maior do que as barragens à jusante, para as variações de parâmetros de segurança iguais. Conclui-se que as barragens a surgência é uma variável importante na segurança de barragens e pode acarretar em fatores de segurança críticos, tendo variações de até 25% na margem de segurança.

Abstract – Recent cases of tailings dam failures impose constant advances in safety assessment techniques for these structures around the world. Portfolio analysis is considered a routine assessment technique to ensure dam safety, however its application is subjective and dependent on the inspector's expertise. In this sense, this article presents the results of the evaluation of the influence of water outcrop on the safety factor of tailings dams in order to reduce subjectivity in portfolio analyses. This paper performed numerical simulations of three heightened dams downstream and two heightened dams upstream, with variation of the embankment and tailings resistance parameters for three types of water outcrop (small, medium and large magnitude), totaling a sample space of 270 analyses. The results show that there were average reductions in the safety margin of 8%, 15% and 25% for small, medium and large magnitude water outcrop, respectively. The sample standard deviation of analyzes ranged between 8-12%. It was observed that for the water outcrop of lesser magnitude, the upstream dams had greater variations in the safety factors than the downstream dams, for the same variations in safety parameters. Concludes that the water outcrop in dams is an important variable in the safety of dams and can lead to critical safety factors, with variations of up to 25% in the safety margin.

Palavras-Chave – Segurança de Barragens; Análise em Portfólio; Anomalias; Surgência.

¹ PhD, Professor do Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET: Belo Horizonte – MG (31) 989165505 E-mail: thiagomorandini@cefetmg.br

² PhD Student, Universidade Federal de Brasília – UNB: Brasília – DF, (819) 760-0321, Email: weberanselmosdosramossouza@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As barragens foram implementadas por volta de 1920, evitando a disposição de rejeito em vales e lagos. Embora as barragens ao longo do tempo terem se mostrado fundamentais para esses impactos, os riscos nela associados não podem ser mais ignorados. As rupturas dessas estruturas são raras, contudo podem ser catastróficas, sendo assim fundamental avanços na avaliação de segurança que mitiguem possíveis riscos (Zhang et al., 2016).

De acordo com relatório de segurança de barragens (ANA, 2017), foram identificados 22.920 barragens cadastradas para diversas finalidades, sendo que apenas 4.159 possuem classificação em relação dano potencial associado à ruptura. Dessas barragens classificadas, 49% possuem alto dano potencial associado à ruptura, indicando que 2.053 barragens têm potencial de causar perdas de vidas humanas em caso de ruptura.

Com os desastres recentes, como a ruptura da barragem de Mount Polley no Canadá em 2014, a ruptura da barragem de Fundão no município de Mariana em 2015 e da barragem B1 no município de Brumadinho em 2019, iniciaram uma ampla discussão a respeito do sistema regulatório vigente, aspectos construtivos e aspectos científicos para avaliação da condição de segurança das barragens existentes. Estudos recentes tem avaliado o risco e propondo evoluções nos métodos avaliação de segurança em barragens, tais como Bowles *et al.* (1999), Bowles (2000), Fell et al. (2000), Hartford and Baecher (2004), ICOLD (2009), Jeon et al. (2009), Schultz et al (2010), Curt et al. (2011), Zhang et al. (2016), e Morgenstern (2018).

Neste contexto, este artigo mostra os resultados de simulações de surgências (por elevação de nível d'água no aterro ou rejeito) em barragens tipo com propósito de estabelecer a influência dessa anomalia sobre a segurança de barragens de forma determinística. Assim, os resultados mostrados visam estabelecer uma forma de análise em portfólio que possa auxiliar gestores de barragens na garantia de estabilidade e confiabilidade dessas estruturas.

Ressalta-se que os resultados apresentados limitam-se à avaliação do fator de segurança do talude jusante por equilíbrio limite devido à elevação do nível d'água e conseqüente afloramento no talude (surgência), não se estendendo à avaliações de outros modos de falha que podem ocorrer em situações de nível d'água elevado, como piping e liquefação.

Por fim, justificam-se as simulações de surgências com o propósito da possibilidade de comparação ou mesmo adequações de outros métodos de análise em portfólio existentes, como por exemplo a matriz de classificação quanto à categoria risco da resolução n° 95 (Agência Nacional de Mineração – ANM, 2022), que apresenta a surgência como item de avaliação do estado de conservação das barragens (Quadro 3 da referida resolução).

2. METODOLOGIA

2.1. Modelos Analisados

O objetivo desse artigo é avaliar como a surgência afeta quantitativamente a segurança de barragens, uma vez que essa anomalia é verificada apenas por meios qualitativos, segundo os critérios de segurança utilizados atualmente. A magnitude da anomalia foi realizada através da comparação entre os FS de uma mesma seção e mesmos parâmetros geotécnicos, minimizando, assim, a interferência do perfil analisado (altura e inclinação dos taludes).

Para avaliação da surgência sobre a segurança de barragens foram propostos modelos de barragens de forma a abranger barragens de pequeno, médio e grande porte, assim como barragens alteadas à jusante e à montante. A Figura 1 (a) mostra a seção tipo das barragens utilizadas para as simulações, sendo denominadas B1, B2 e B3 as barragens alteadas à jusante de pequeno, médio e grande porte, respectivamente, e B4 e B5 as barragens alteadas à montante de médio e grande porte, respectivamente.

Já a Figura 1 (b) apresenta um detalhe da seção da barragem B4, a título de exemplo, a fim de se demonstrar como foi posicionada a surgência. As surgências foram consideradas no talude de jusante, variando-se a altura dessa anomalia.

As características geométricas das referidas barragens são apresentadas na Tabela 1, enquanto a Tabela 2 apresenta os parâmetros geotécnicos dos materiais empregados nas simulações. Os parâmetros geotécnicos foram selecionados visando representar características de resistência tipicamente encontrados nas barragens brasileiras. Ressalta-se que para as barragens alteadas à jusante foi escolhido um rejeito tipicamente não drenado (resistência não-drenada), enquanto para as barragens alteadas à montante foi escolhido um rejeito com granulometria de areia fina (baixo atrito e sem coesão).

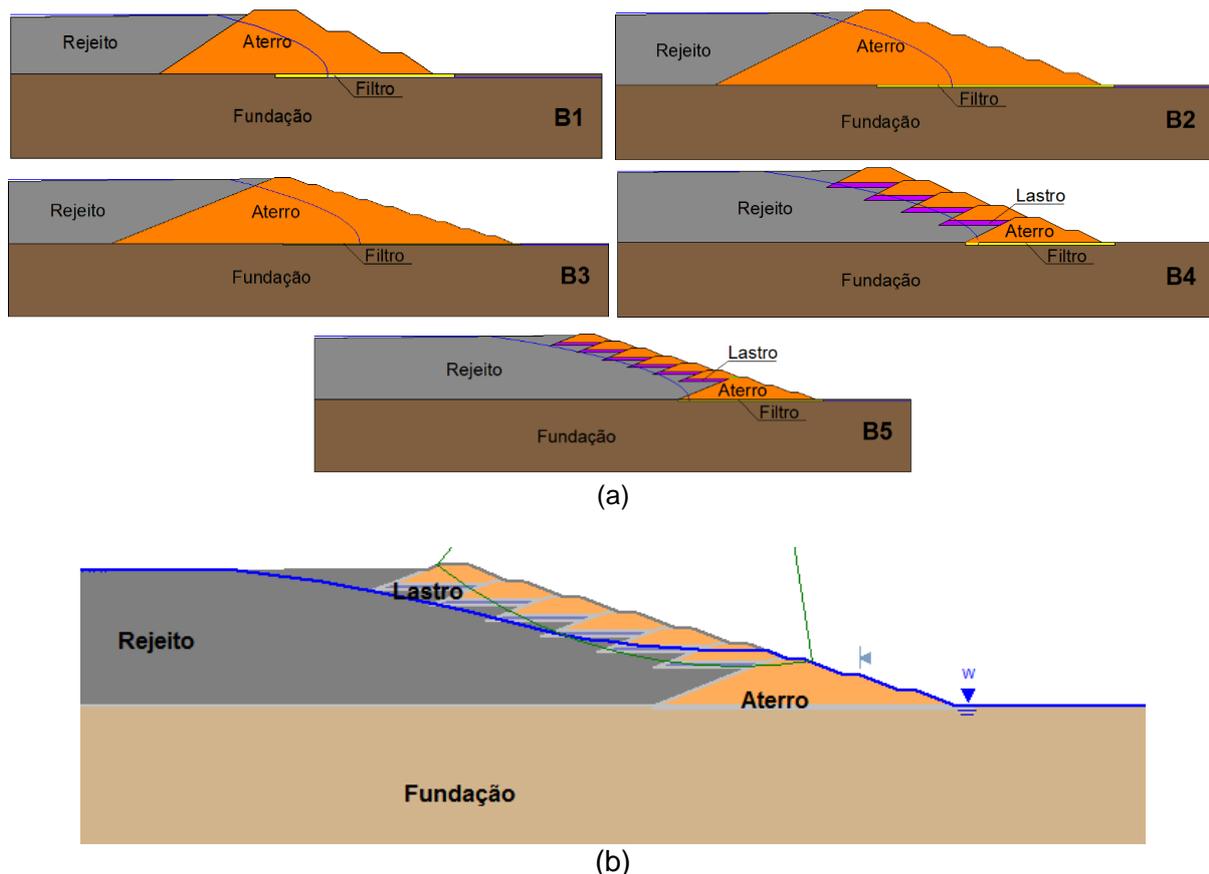


Figura 1. Modelos teóricos de barragens (a) empregadas nas simulações e exemplo de surgência de grande magnitude para o modelo B5 (b).

Visando obter uma similaridade entre os modelos analisados e às barragens reais, tanto o atrito do aterro quanto a resistência do rejeito (atrito ou resistência não-drenada) foram modificados em 4 valores inferiores e superiores de modo que cada modelo analisado (B1 a B5) representem 18 barragens, totalizando um universo de 90 barragens simuladas para cada uma. Assim, o espaço amostral foi de 270 análises.

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
B4	30	1:2,0	5	Montante
B5	45	1:2,5	5	Montante

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	18° a 34°	-
Rejeito ¹	16	-	0°	12 a 28 + 4 kPa/m
Rejeito ²	16	0	16° a 24°	-
Lastro	16	10	20°	-
Filtro	18	0	30°	-

¹Rejeito empregado nas barragens alteadas a jusante com resistência não drenada crescente com a profundidade.

²Rejeito empregado nas barragens alteadas a montante.

Ressalta-se que foi considerada a premissa que as barragens alteadas a montante teriam rejeitos que permitissem tal construção, ou seja, rejeitos com granulometria predominante compostos por areia fina e média permitiriam, primeiramente, alteamentos a montante, enquanto rejeitos com granulometria predominantemente argilosa não permitiriam esse método de alteamento. Assim, foram considerados parâmetros compatíveis de areia fina e argila mole para os rejeitos das barragens alteadas a montante e jusante, respectivamente.

2.2. Método de Avaliação

A avaliação da segurança dos modelos propostos foi realizada através do cálculo do FS do talude de jusante empregando-se o software Slide 6.0®. Foram consideradas análises na condição ideal de projeto (sem presença de anomalias), assim como análises simulando as surgências (conforme Figura 1b) de pequeno, médio e grande porte, denominadas respectivamente de magnitudes 1, 2 e 3, definidas em hipótese como:

- Surgência de pequeno porte (magnitude 1): considera a colmatção da drenagem interna, surgência localizada no pé da estrutura, e com nível d'água normal próximo ao eixo da barragem;
- Surgência de médio porte (magnitude 2): considera a colmatção da drenagem interna, surgência localizada acima da primeira berma, e com nível d'água ligeiramente elevado próximo ao eixo da barragem;
- Surgência de grande porte (magnitude 3): considera a colmatção da drenagem interna, surgência localizada acima da segunda berma, e com nível d'água consideravelmente elevado próximo ao eixo da barragem;

Na implementação do método procedeu-se a análise prévia para definição das seções e parâmetros geotécnicos da condição ideal de projeto de modo a resultar em um FS superior 1,5, mas não superior a 2,2, comparando Após a definição das seções ideais de projeto, foi calculado o FS para esta condição de projeto (simulando variações dos parâmetros de aterro e rejeitos), assim como calculado o FS para as condições -se os FS conforme cálculo detalhado adiante. Destaca-se que a comparação entre os FS da condição de projeto e da condição de anomalias foi realizada fixando-se os parâmetros geotécnicos para que estes não interferissem nos resultados.

Foram adotadas as seguintes premissas nas análises de estabilidade:

- Critério de ruptura de Mohr-Coulomb;
- Superfícies circulares de ruptura;
- Método de análise de Morgenstern-Price que satisfaz, simultaneamente, o equilíbrio de forças e momentos entre fatias.

Para a avaliação da perda de segurança em barragens de rejeito devido à presença de surgência, partiu-se da definição de margem de segurança (MS) presente em Schultz et al. (2010), dado pela diferença entre forças de resistência (R) e forças de carregamento (C), conforme equação 1. Sabendo que o FS é definido pela razão entre essas entre R e C (equação 2), define-se MS em função de FS conforme equação 3.

$$MS = R - C \quad (1)$$

$$FS = \frac{R}{C} = \frac{MS+C}{C} \quad (2)$$

$$MS = FS - 1 \quad (3)$$

A magnitude relativa do efeito das anomalias (surgências) foi determinada a partir do conceito de perda relativa de margem de segurança (ΔMS), conforme equação 4, dado pela diferença entre o FS inicial do projeto (FS_0) e o FS contendo alguma anomalia (FSA).

$$\Delta MS = \frac{FS_0 - FS_A}{MS} \quad (4)$$

Considerando que o FSA é a própria condição real de segurança de uma barragem (CRS) para uma barragem quando é considerada uma anomalia, define-se CRS calculado por FS_0 , MS e ΔMS , conforme equações 5 e 6.

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

$$CRS = FS_0 - MS \sum \Delta MS \quad (6)$$

É importante salientar que a equação 6 somente será válida se o efeito da superposição dos efeitos de anomalias sobre a MS for verificado. Neste caso, o efeito de todas anomalias poderá ser representado pelo somatório simples de ΔMS . Nesse artigo, não será avaliado esse efeito.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações para avaliação da influência da surgência sobre a segurança de barragens em termos de ΔMS é apresentado graficamente na Figura 2, mostrando o efeito das surgências de pequena magnitude (a-b), média magnitude (c-d) e grande magnitude (e-f).

Nas avaliações foram consideradas a variação do ângulo de atrito do aterro (a-c-e) e a variação da resistência não drenada do rejeito para as barragens B1, B2 e B3 ou ângulo de atrito do aterro para as barragens B4 e B5 (b-d-f). Além disso, a figura mostra também o ΔMS médio para todas as simulações (linha horizontal contínua) e o desvio padrão dos resultados para todas as simulações (linha horizontal tracejada).

De forma geral, constata-se que o conjunto de dados possui uma dispersão maior para a barragem B4 em relação às demais barragens, com valores $\Delta MS > 37\%$. Apesar da B5 ter maior altura, a inclinação de 2H para 1V fez com que a B4 fosse mais crítica, como se pode observar. As demais estruturas, se apresentam em torno do ΔMS médio calculado. Comparado com a avaliação da erosão em Morandini (2019), as surgências são mais críticas que as erosões.

Por outro lado, apesar de resultados relativamente uniformes para ΔMS , é possível observar que, de forma geral, o impacto sobre a segurança foi maior para as simulações com parâmetros de resistência menores, tanto para o aterro quanto para o rejeito. Destacam-se nessa observação a barragem B2 em relação à variação do atrito do aterro (Figura 4-a-c-e) e a barragem B5 em relação a variação do atrito do rejeito (Figura 4-b-d-f). Essa observação traz uma importante reflexão para casos práticos: significa que barragens construídas com materiais com menores parâmetros de resistência são mais sensíveis às surgências, ou seja, barragens que normalmente possuem fator de segurança inferiores podem ter esse fator de segurança bastante diminuído devido à observação de surgências.

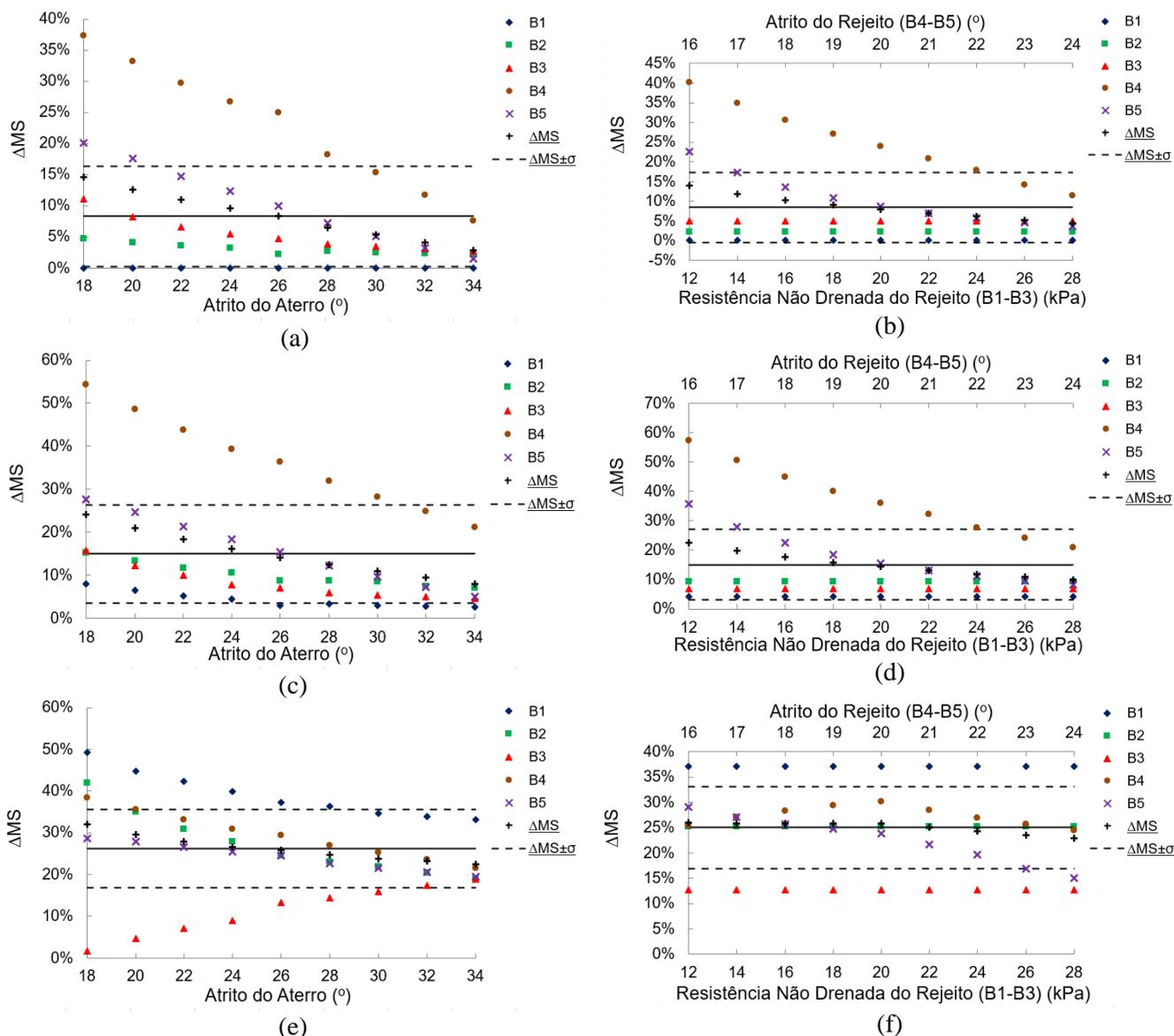


Figura 2. Influência de surgências de magnitude 1 (a-b), 2 (c-d) e 3 (e-f) na segurança de barragens (ΔMS) em função do atrito do aterro (a-c-e) e resistência do rejeito (b-d-f).

Avaliando-se o ΔMS nas barragens alteadas à jusante (B1, B2 e B3), observa-se uma tendência em que a barragem B1 foi a mais impactada em relação à B2 e B3, indicando que surgências afetam mais negativamente barragens de pequeno porte e com taludes mais inclinados. Já nas barragens alteadas à montante (B4 e B5), o ΔMS foi sempre maior para a barragem B4 em relação à B5, indicando um maior impacto de surgências nas barragens com taludes mais inclinados. Comparando-se todas as barragens, de forma geral pode-se afirmar que as barragens alteadas à montante (B4 e B5) possuem maior sensibilidade às surgências do que as barragens alteadas a jusante (B1, B2 e B3).

Em termos médios, as surgências de magnitude 1 resultaram em ΔMS em cerca de 8%, as surgências de magnitude 2 em cerca de 14% e as surgências de magnitude 3 em cerca de 25%. Esta tendência pode ser melhor observada no ajuste linear da Figura 3. Esse resultado foi coerente tanto na variação do atrito do aterro quanto na variação dos parâmetros de resistência do rejeito.

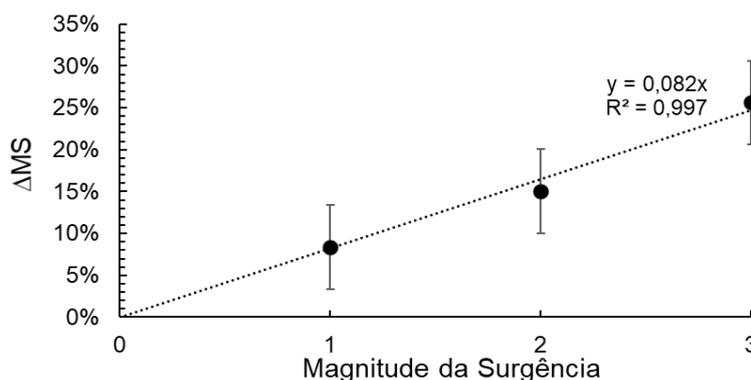


Figura 3 – Variação de ΔMS em função da magnitude das surgências.

O ajuste linear da Figura 3 demonstra que existe uma proporcionalidade entre a magnitude das surgências e a perda relativa da margem de segurança. Observa-se que pelo coeficiente de determinação que 99% dos dados se ajustariam ao modelo, sendo: surgência de pequena magnitude, $\Delta MS = 8 \pm 5\%$; surgência de média magnitude, $\Delta MS = 14 \pm 5\%$; surgência de grande magnitude, $\Delta MS = 25 \pm 5\%$.

Desta forma, pode-se afirmar que surgência não se trata apenas de uma anomalia associada à fenômenos de erosão interna como comumente é aceito na geotecnia, e sim um fenômeno que de fato pode diminuir significativamente o fator de segurança de uma barragem.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível avaliar o efeito de erosões e trincas anomalias sobre a segurança de barragens, sendo possível sintetizar as principais conclusões do estudo:

- (1) Foi possível quantificar o efeito sobre a perda relativa da margem de segurança de barragens devido à surgências através de análises em modelos computacionais;
- (2) A maioria dos resultados das simulações se distribuíram dentro dos limites do desvio padrão, sendo verificado uma diminuição sobre a margem de segurança de aproximadamente 8%, 14% e 25% respectivamente para surgências de pequena, média e grandes magnitudes;
- (3) Demonstrou-se com um desvio aceitável que o efeito de surgências sobre a margem de segurança é relativamente linear com a magnitude da surgência, ou seja, quanto mais elevado o nível d'água no corpo da barragem, assim como quanto mais elevado o ponto de afloramento da surgência no talude de jusante, maior será o efeito no fator de segurança;
- (4) De maneira indireta, foi possível concluir que as surgências induzem maior redução de fator de segurança em barragens alteadas à montante em relação às barragens alteadas à jusante, assim como em barragens com maior inclinação do talude de jusante;
- (5) Comparado ao estudo anterior (Morandini, 2019), pode-se afirmar que surgências possuem maior efeito de redução de fator de segurança quando comparada a outras anomalias (trincas e erosões);
- (6) Os resultados demonstram que a surgência é um importante item a ser avaliado durante inspeções ou auditorias de segurança de barragens, validando a pontuação atribuída ao item "percolação" do Quadro 3 – Estado de Conservação de Barragens (ANM, 2022).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – pelo apoio financeiro destinado ao projeto (processo APQ 00835-16).

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas (2017). Relatório de segurança de barragens 2016. ANA, Brasília, 225 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, 49 p.
- Bowles, D.S.; Anderson, L.R.; Glover, T.F.; Chauhan, S.S. (1999). Understanding and managing the risk of aging dams: principals and case studies. In: 19th USCOLD Annual Meeting and Lecture, Atlanta, USA.
- 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.
- Curt, C.; Talon, A.; Mauris, G. (2011). A dam assessment support system based on physical measurements, sensory evaluations and expert judgements. *Measurement*, 44 (1): 192-201.
- 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
- Hartford, D.N.D., and 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.
- Jeon, J.; Lee, J.; Shin, D.; Park, H. (2009). Development of dam safety management system. *Advances in Engineering Software*, 40 (1): 554-563.
- Morgenstern, N.R. (2018). Geotechnical Risk, Regulation, and Public Policy. *Soils and Rocks*, 41(2): 107-129.
- 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.