

INFLUÊNCIA DE EROSÕES SUPERFICIAIS E TRINCAS NA SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO

Influence of surface erosions and cracks in tailings dams safety

Thiago Luiz Coelho Morandini^a

^a Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET, Belo Horizonte, Brasil.

RESUMO – O número crescente de rupturas de barragens de rejeito impõe avanços constantes nas técnicas de avaliação de segurança destas estruturas. A análise em portfólio é considerada a técnica de avaliação mais ágil na rotina de garantia de segurança; entretanto sua aplicação é muitas vezes subjetiva e dependente da expertise do avaliador. Neste sentido, este artigo apresenta os resultados da avaliação de influência de erosões e trincas na segurança de barragens de rejeito objetivando a diminuição de subjetividade em análises em portfólio. Foram simuladas 5 barragens tipo, tanto alteadas a jusante quanto a montante, com variação de parâmetros de resistência do aterro e do rejeito, totalizando um universo de dados de 90 barragens. Também foram simuladas erosões superficiais e trincas de pequena, média e grande magnitudes, assim como o efeito combinado dessas anomalias. Os resultados demonstraram a perda da margem de segurança para erosões de 3,5%, 7,0% e 10,5% e para trincas de 8%, 16% e 24%. Os resultados para as simulações combinadas revelaram que a superposição dos efeitos pode ser aproximada pela soma simples da perda de margem de segurança das anomalias averiguadas. Conclui-se que a técnica de levantamento de anomalias em campo para avaliação do impacto sobre a segurança de barragens de rejeito é válida, indicando que é possível aplicar as análises em portfólio com menor subjetividade do avaliador. Conclui-se também que esta técnica pode ser expandida e contribuir para avaliações frequentes e garantia de segurança de barragens de rejeito.

SYNOPSIS – The increasing number of ruptures of tailings dams imposes constant advances in the techniques of safety assessment of these structures. Portfolio analysis is considered the most agile assessment technique in the safety assurance routine; however, its application is often subjective and dependent on the evaluator's expertise. In this sense, this article presents the results of the evaluation of the influence of erosions and cracks on the safety of tailings dams aiming at the decrease of subjectivity in portfolio analysis. Five typical dams, both upstream and downstream raised, were simulated with varying strength parameters of the landfill and tailings, totalling a universe of 90 dams. Surface erosions and cracks of small, medium and large magnitudes were simulated as well as the combined effect of these anomalies. The results indicated the loss of safety margin for erosions of 3.5%, 7.0% and 10.5% and for cracks of 8%, 16% and 24%. The results for the combined simulations revealed that the overlap of effects can be approximated by the simple sum of the loss of safety margin of the anomalies ascertained. It is concluded that the field anomaly survey technique for evaluating the impact on the safety of tailings dams is valid, indicating that it is possible to apply the portfolio analysis with less subjectivity of the evaluator. It is also concluded that this technique can be expanded and contribute to frequent evaluations and safety assurance of tailings dams.

Palavras Chave – Segurança de barragens, análise em portfólio, anomalias.

Keywords – Safety of dams, portfolio analysis, anomalies.

E-mails: thiagomorandini@cefetmg.br

1 – INTRODUÇÃO

Embora as barragens ao longo do tempo se tenham mostrado fundamentais para o desenvolvimento industrial de uma sociedade, os impactos sobre o meio ambiente e vidas humanas não podem ser negligenciados. Embora raras, as rupturas de barragens podem ser catastróficas, sendo assim fundamentais avanços na avaliação de segurança que mitiguem possíveis riscos de rupturas (Zhang et al., 2016).

No Brasil, o relatório de segurança de barragens (ANA, 2017) identifica 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.

Desastres recentes como 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, dos aspectos construtivos e dos aspectos científicos para avaliação da condição de segurança das barragens existentes. Ressalta-se que esses dois desastres ocorreram em barragens de rejeito com alteamentos a montante, sendo que a barragem de Fundão foi alteada pelo processo de aterro hidráulico (o corpo da barragem construído com o próprio rejeito) enquanto a barragem B1 foi alteada com aterros compactados convencionais.

Avanços científicos no campo de segurança de barragens sob diferentes metodologias são descritos em Duncan (1996), Bowles (2000), Jeon et al. (2009) e Morgenstern (2018) e também regulamentados em ICOLD (2005, 2009). Segundo estes autores, os principais métodos de avaliar e garantir a segurança de barragens são (1) análises determinísticas por equilíbrio limite; (2) análises probabilísticas; (3) análises em portfólio; (4) análises de risco ou análises de risco em portfólio.

O consenso atual é que diante da complexidade de fatores que influenciam no comportamento de barragens (e.g. dispersão de parâmetros geotécnicos; discrepâncias entre projeto e execução; operação em desacordo com o manual descrito no projeto; critérios subjetivos do auditor nas inspeções e auditorias), a segurança não deve ser abordada apenas por um método de análise e sim por métodos que se complementem. Ou ainda através de desenvolvimento de métodos que unam diferentes conceitos, tal como exemplificado por Hariri-Ardebili (2018) na evolução das análises determinísticas e probabilísticas.

Neste contexto, este artigo mostra os resultados de simulações de erosões superficiais e trincas em barragens tipo com propósito de estabelecer a influência dessas anomalias sobre a segurança de barragens de forma determinística. Portanto, conseqüentemente, 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.

2 – SEGURANÇA DE BARRAGENS

É importante salientar que, apesar de muitas similaridades, historicamente as barragens de reservação de água tiveram as maiores causas de rupturas relacionadas aos processos de galgamento e *piping* (não abordados no presente artigo). Nesta revisão são apresentados conceitos de segurança aplicados tanto às barragens de rejeito quanto às barragens de reservação de água, porém com foco nos processos de ruptura relacionados a escorregamentos de taludes.

Morgenstern (2018) descreve que acidentes recentes em barragens de rejeito evidenciaram que era necessária uma abordagem geotécnica diferenciada para este tipo de estrutura em relação às barragens de água, fato esse que refletiu diretamente no marco regulatório e política pública de diversos países.

Por exemplo, a antiga prática no Chile de alteamentos a montante de forma desordenada desencadeou uma série de rompimentos, obrigando o país a estabelecer o primeiro marco regulatório específico para barragens de rejeito em 1970, proibindo a construção de barragens alteadas a

montante (Valenzuela, 2016). Após este marco, foram estabelecidos regulamentos específicos para barragens de rejeito nos estados canadenses da Colúmbia Britânica e Alberta em 1972 e 1978 respectivamente, sendo estes regulamentos alicerces para os manuais da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1982, 1989). Mais recentemente, Morgenstern (2018) descreve que foram identificados avanços em políticas regionais nos EUA e Austrália, assim como em leis nacionais (e.g. Brasil, 2010).

Em consonância com a evolução dos marcos regulatórios, as técnicas de avaliação de segurança de barragens também mostraram desenvolvimento, como descreve Hariri-Ardebili (2018): inicialmente, os marcos regulatórios estabeleciam apenas fatores de segurança mínimos através de análises determinísticas, passando posteriormente a abordar técnicas de inspeções e roteiros em análises em portfólio; mais recentemente, especialistas têm preconizado análises probabilísticas e análises de risco com modos de falhas para garantir a segurança e confiabilidade das estruturas, assim como determinar a consequência no caso de falha.

Tradicionalmente, a segurança de barragens é expressa em termos de fator de segurança (FS), dado pela razão entre as forças de resistência do solo e as forças de carregamento mobilizadas (Duncan, 1996). Esse método, denominado método de equilíbrio limite, é a técnica mais bem consolidada para segurança determinística em avaliação de barragens (Jansen, 1983). O fator de segurança mínimo deve atender ao valor estabelecido pelas normas de cada país.

Hariri-Ardebili (2018) sustenta que a análise determinística, apesar de prática e de fácil entendimento, possui limitações: (1) trata o carregamento como uniforme; (2) não considera as incertezas da resistência do solo e a demanda mobilizada (3) não permite verificar a confiabilidade da estrutura. Já para Silva et al. (2008), o principal problema na análise determinística é que o FS não necessariamente significa confiabilidade, ou seja, uma estrutura com alto FS não necessariamente implica um baixo risco de ruptura. Tanto Silva et al. (2008) quanto Hariri-Ardebili (2018) defendem que existe uma tendência de análise probabilística ou análise de risco em substituição à análise determinística convencional.

Cabe destacar a diferença entre as análises probabilísticas e as análises de risco. A princípio, as análises probabilísticas demonstram um aprofundamento da análise determinística, tal como definido em USACE (1992): deve-se determinar as incertezas dos parâmetros utilizados na análise determinística (e.g. parâmetros de resistência e rigidez dos solos, carregamentos, magnitude de sismos) para então calcular não somente o FS , mas também a probabilidade deste FS ser menor do 1 (ruptura hipotética). Neste caso, a quantificação das incertezas deve ser realizada através de uma modelagem de distribuição (simulação de Monte Carlo, método pseudo-aleatório ou método quasirandom).

Schultz et al. (2010) ilustra na Figura 1 a análise probabilística em termos de distribuição normal das incertezas de forças de resistência e de carregamento, assim como o efeito sobre a margem de segurança, dada pela diferença entre a resistência e carregamento. Neste caso, a margem de segurança média é dada por μ , o índice de confiabilidade é dado por β , p indica a probabilidade de falha da estrutura, e σ indica o desvio padrão. A margem de segurança citada pelos autores também pode ser definida como $FS - 1$, como demonstrado adiante.

As análises de risco, por sua vez, são análises que computam não somente a probabilidade de ruptura da estrutura, mas também a consequência dessa ruptura (inerente a própria definição de risco). Hartford e Baecher (2004) descrevem que atualmente a principal forma de se proceder uma análise de risco é através de uma árvore de eventos, discriminando suas vantagens: (1) é uma ferramenta essencialmente gráfica; que (2) fornece uma visão qualitativa para um sistema; e (3) pode ser usado para estimar quantitativamente a confiabilidade da estrutura.

A análise de risco através de uma árvore de eventos é dada da resposta de um sistema de barragem a um evento inicial (e.g. chuva intensa), que pode ocasionar uma reação em cadeia de falhas parciais (e.g. elevação do nível do reservatório, ou surgência) até um modo de falha da estrutura (e.g. ruptura por piping), isto é, determina a probabilidade de um evento inicial ocasionar a ruptura da estrutura (Bowles et al. 1999).

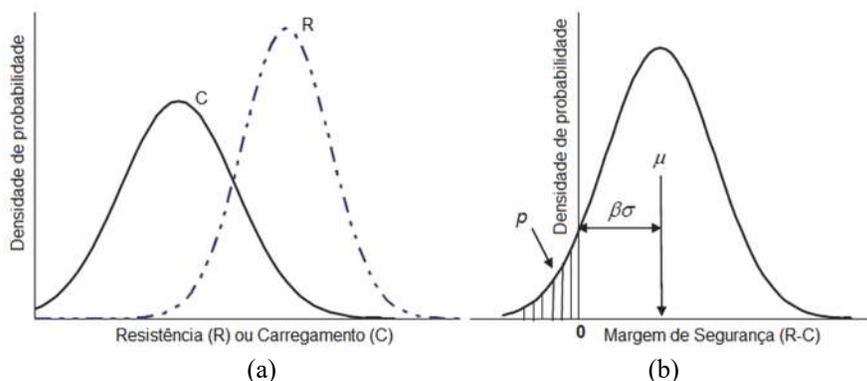


Fig. 1 – Incertezas nas forças de resistência e de carregamento (a) e distribuição de probabilidade para a margem de segurança (b) (Schultz et al. 2010).

Aceito atualmente como a forma mais completa de se avaliar a segurança de barragens, as análises de risco também possuem pontos falhos ou desvantagens como citam Hartford e Baecher (2004): para cada evento existe um nó binário mutuamente excludente, ou seja, contendo probabilidade (P) de desencadear outro evento ou seu complemento ($1 - P$) de não desencadear, porém, os eventos podem desencadear resultados discretos ou até mesmo ter resultados contínuos, não simplesmente o binário sim ou não de probabilidade de ocorrência.

Além disso, também destacado por Hartford e Baecher (2004), as atribuições numéricas de probabilidades dos eventos e os valores de consequências muitas vezes não utilizam um modelo estatístico apropriado e normalmente incluem valores dependentes de juízos subjetivos de especialistas. Do mesmo modo, modelos recentes de árvore de eventos têm adotado um número crescente de nós para um determinado modo de falha, implicando que, para este modo de falha, a probabilidade de falha está sendo calculada através de um produtório de uma série de eventos com probabilidades inferiores a 1. Logo, as probabilidades de eventos iniciais causarem falhas nas estruturas têm diminuído ao longo do tempo sem que a devida correção seja efetuada para os limites aceitáveis.

Bowles et al. (1999) defendem as análises de risco para a avaliação de segurança de barragens, porém reconhecem que muitas vezes os cenários estudados nas análises de risco não representam a realidade da estrutura, além de serem dispendiosas e dependerem de um tempo relativamente grande para serem efetuadas. Bowles (2000) sustenta que a forma de análise mais adequada para avaliar a condição real de segurança de barragens é a análise em portfólio.

A análise em portfólio para segurança de barragens de rejeito é considerada um padrão de prática em diversos países, tais como Canadá, Austrália e Brasil, tendo como desafio atual a melhora contínua dos componentes da estrutura a serem avaliados, assim como a padronização de legislações sobre os critérios de aceitabilidade (Bowles, 2000).

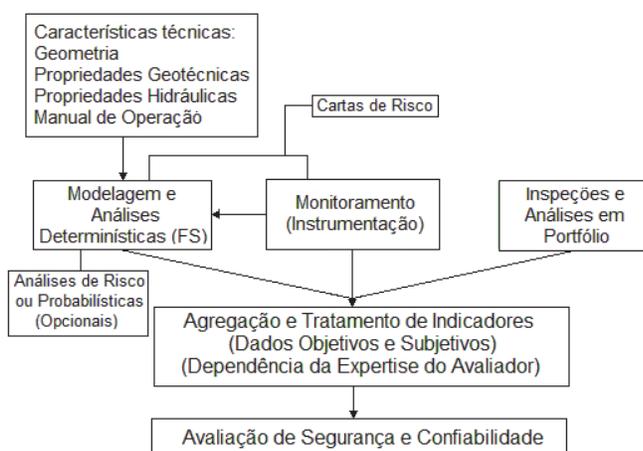
As análises em portfólio, embora fundamentadas no risco, estabelecem padrões mínimos de aceitabilidade regionais ou nacionais, empregando inspeções de rotina para avaliações do estado de conservação, dados de monitoramento e ações de manutenção para cada barragem (Bowles, 2000). Por outro lado, como principal desvantagem das análises em portfólio, Bowles et al. (1999) destacam o caráter subjetivo na interpretação das anomalias identificadas e dos dados de monitoramento, podendo o resultado ser função da *expertise* do especialista. O fluxograma para avaliação de segurança em portfólio segundo Curt et al. (2011) pode ser visualizado na Figura 2.

Fell et al. (2000) enfatizam que as análises em portfólio são fundamentais para a adequação de todas as estruturas de uma barragem, assim como para a identificação de pontos falhos e consequente desenvolvimento de programas de segurança e medidas gerais de redução de riscos. Além disso, os referidos autores destacam que a análise em portfólio é a única forma de análise que permite uma

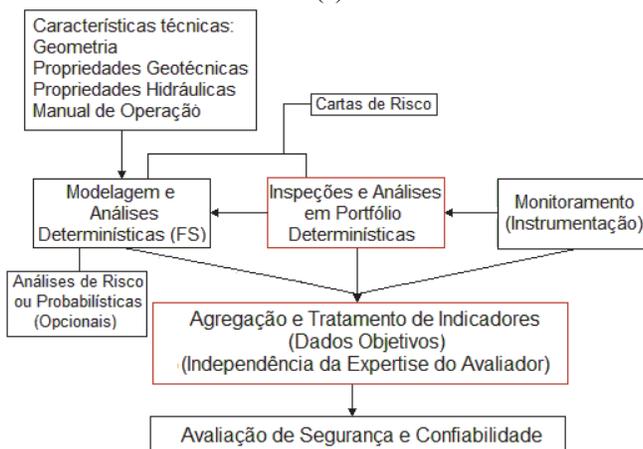
pequena periodização de avaliação, podendo uma barragem ser analisada em intervalos de tempo diários, semanais ou mensais.

Curt et al. (2011) apresentam um estudo visando reestabelecer uma pontuação adequada para indicadores de anomalias e modos de falha e assim diminuir a subjetividade de especialistas na avaliação de segurança de barragens. Nesse estudo, foram avaliados 15 indicadores de anomalias em diferentes barragens, analisados por 3 experientes especialistas que atribuíram notas de 0 (excelente) a 10 (inaceitável). Os resultados indicaram que não houve unanimidade na atribuição de notas para nenhum indicador analisado, sendo que a dispersão entre notas foi de 10 a 30%. Isto indica uma grande subjetividade na avaliação de segurança através de análises em portfólio, fato que pode ainda ser agravado se consideramos diferentes níveis de competência e experiência dos avaliadores.

Conforme descrito nesta revisão, não existe um método de análise que elimine completamente o risco de falha de uma barragem. Porém é unânime entre os especialistas que o método determinístico, que estabelece um *FS*, não deve ser preterido em função do surgimento de novas técnicas de análise, e sim complementado e desenvolvido de forma global compreendendo análises



(a)



(b)

Fig. 2 – Método de avaliação de segurança de barragens por Curt et al. (2011) (a) e proposta de alteração a partir dos resultados apresentados neste artigo (b).

determinísticas e probabilísticas, análises de risco, monitoramento e inspeções de especialistas com análises em portfólio (Curt et al, 2011).

Neste contexto, a partir da verificação das vantagens e desvantagens de cada método de análise apresentado, o presente trabalho apresenta os resultados que demonstram critérios determinísticos sobre o *FS* a partir de observações de anomalias apuradas em inspeções na análise de portfólio, neste caso, erosões e trincas. Apresenta-se na Figura 2-a como ocorre a avaliação de segurança de barragens por Curt et al. (2011) e na Figura 2-b como os resultados da presente pesquisa contribuem para esta avaliação de segurança de barragens, estabelecendo inspeções e análises em portfólios com critérios determinísticos e diminuindo a subjetividade dos avaliadores especialistas.

3 – METODOLOGIA

3.1 – Modelos Analisados

A proposta do artigo é avaliar como anomalias podem afetar quantitativamente a segurança de barragens, uma vez que essas anomalias são verificadas apenas qualitativamente segundo os critérios de segurança atuais. 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 de trincas e erosões superficiais 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 a jusante e a montante. A Figura 3 (a) mostra a seção tipo das barragens utilizadas para as simulações, sendo denominadas B1, B2 e B3 as barragens alteadas a jusante de pequeno,

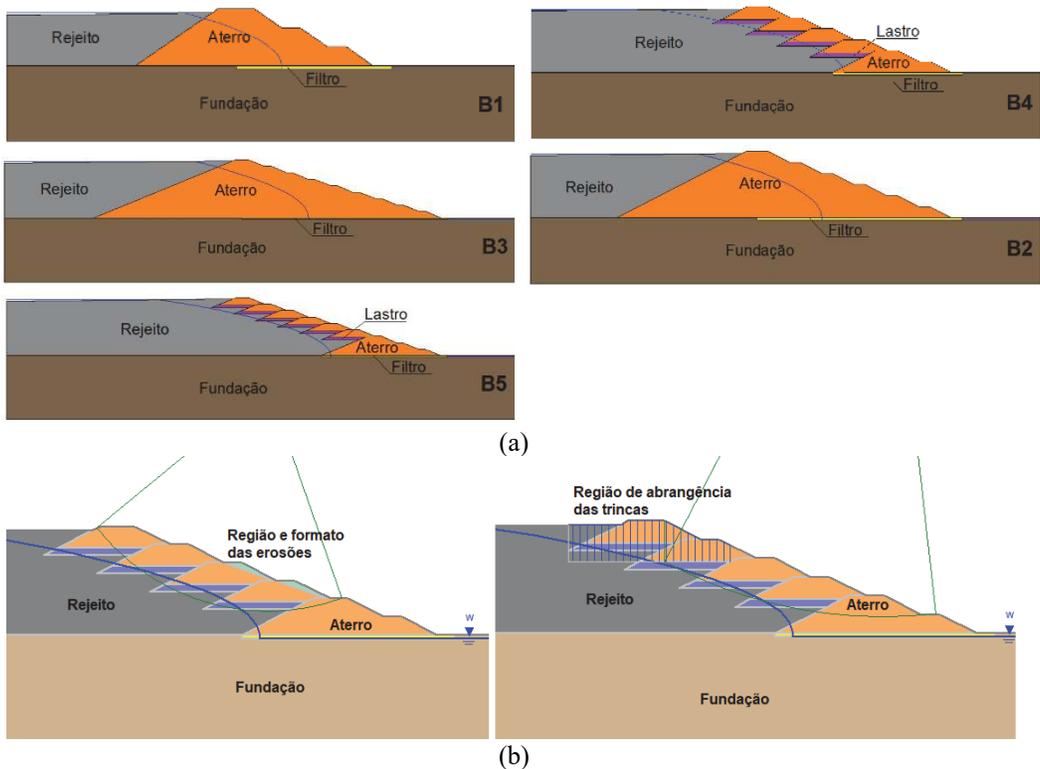


Fig. 3 – Seção tipo das barragens utilizadas nas simulações (a) e detalhe das anomalias (b).

médio e grande porte, respectivamente, e B4 e B5 as barragens alteadas a montante de médio e grande porte, respectivamente.

Já a Figura 3 (b) apresenta um detalhe da seção da barragem B4, a título de exemplo, a fim de se demonstrar como foram posicionadas as trincas e erosões nas seções analisadas. As erosões foram consideradas pontuais (simuladas como um espaço vazio transversal da seção), posicionadas nas bermas próximas ao pé da superfície de ruptura, variando-se o número e a profundidade dessas erosões em função da magnitude a ser avaliada. As trincas, por sua vez, foram consideradas transversalmente à seção das barragens, posicionadas de modo a abranger a região de topo da superfície de ruptura, variando-se apenas a sua profundidade. O software determinou a posição exata da trinca que retornaria o menor *FS*.

As características geométricas das referidas barragens são apresentadas no Quadro 1, enquanto o Quadro 2 apresenta os parâmetros geotécnicos dos materiais empregados nas simulações. Os parâmetros geotécnicos foram selecionados visando representar características de resistência tipicamente encontrados nas barragens do Brasil. Ressalta-se que para as barragens alteadas a jusante foi escolhido um rejeito com comportamento não drenado, enquanto para as barragens alteadas a montante foi escolhido um rejeito com granulometria de areia fina (baixo atrito e sem coesão).

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.

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, a priori, 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.

Quadro 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

Quadro 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.

3.2 – 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 erosões superficiais e trincas transversais (conforme Figura 3b) de pequeno, médio e grande porte, denominadas respectivamente de magnitudes 1, 2 e 3, definidas em hipótese como:

- Erosões de pequeno porte (magnitude 1): isoladas, superficiais e situada em apenas uma berma da seção;
- Erosões de médio porte (magnitude 2): numerosas, com profundidade de até 2 m e situadas em até duas bermas da seção;
- Erosões de grande porte (magnitude 3): numerosas, com profundidade de até 4 m e situadas várias bermas da seção;
- Trincas de pequeno porte (magnitude 1): transversais, saturadas, localizadas na crista e com profundidade de até 5% da altura da barragem;
- Trincas de médio porte (magnitude 2): transversais, saturadas, localizadas na crista ou reservatório e com profundidade de até 10% da altura da barragem;
- Trincas de grande porte (magnitude 3): transversais, saturadas, localizadas na crista ou reservatório e com profundidade de até 25% da altura 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. 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 de anomalias, comparando-se os *FS* conforme cálculo detalhado adiante. Além disso, foi calculado o *FS* para combinações de erosões e trincas a fim de se verificar o efeito combinado e a hipótese de validade de superposição dos efeitos. 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 erosões e trincas, partiu-se da definição de margem de segurança (*MS*) presente em Schultz et al. (2010), dada pela diferença entre forças de resistência (*R*) e forças de carregamento (*C*), conforme:

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

Sabendo que o *FS* é definido pela razão entre essas entre *R* e *C*:

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

define-se *MS* em função de *FS* conforme:

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

A magnitude relativa do efeito das anomalias (erosões e trincas) foi determinada a partir do conceito de perda relativa de margem de segurança (ΔMS), conforme a equação seguinte, dada pela diferença entre o FS inicial do projeto (FS_0) e o FS contendo alguma anomalia (FS_A):

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

Considerando que o FS_A 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 as equações seguintes:

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

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

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 .

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Influência de Erosões Superficiais na Segurança de Barragens

Os resultados das simulações para avaliação da influência de erosões sobre a segurança de barragens em termos de ΔMS é apresentado graficamente na Figura 4, mostrando o efeito de erosões 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 pequena variação em relação à média geral (maioria das análises dentro dos limites de desvio padrão), sugerindo que as erosões têm efeito relativamente uniforme na segurança das barragens, independente do seu porte e tipo de alteamento. Fora do desvio padrão, identifica-se que a barragem B3 teve menores valores de ΔMS , provavelmente devido à ser a barragem de maior porte dentre os modelos.

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).

Avaliando-se o ΔMS em erosões de pequena magnitude (Figura 4-a-b), observa-se que a barragem B1 foi a mais impactada, seguidas de B4, B5, B2 e B3, indicando que pequenas erosões afetam mais negativamente barragens de pequeno porte. Já para erosões de magnitude média e grande (respectivamente Figura 4-c-d e Figura 4-e-f), o ΔMS indica um maior impacto nas barragens alteadas a montante (B4 e B5) do que nas barragens alteadas a jusante (B1, B2 e B3), porém também indica que quanto menor o porte da barragem, maior o impacto provocado pelas erosões sobre a segurança.

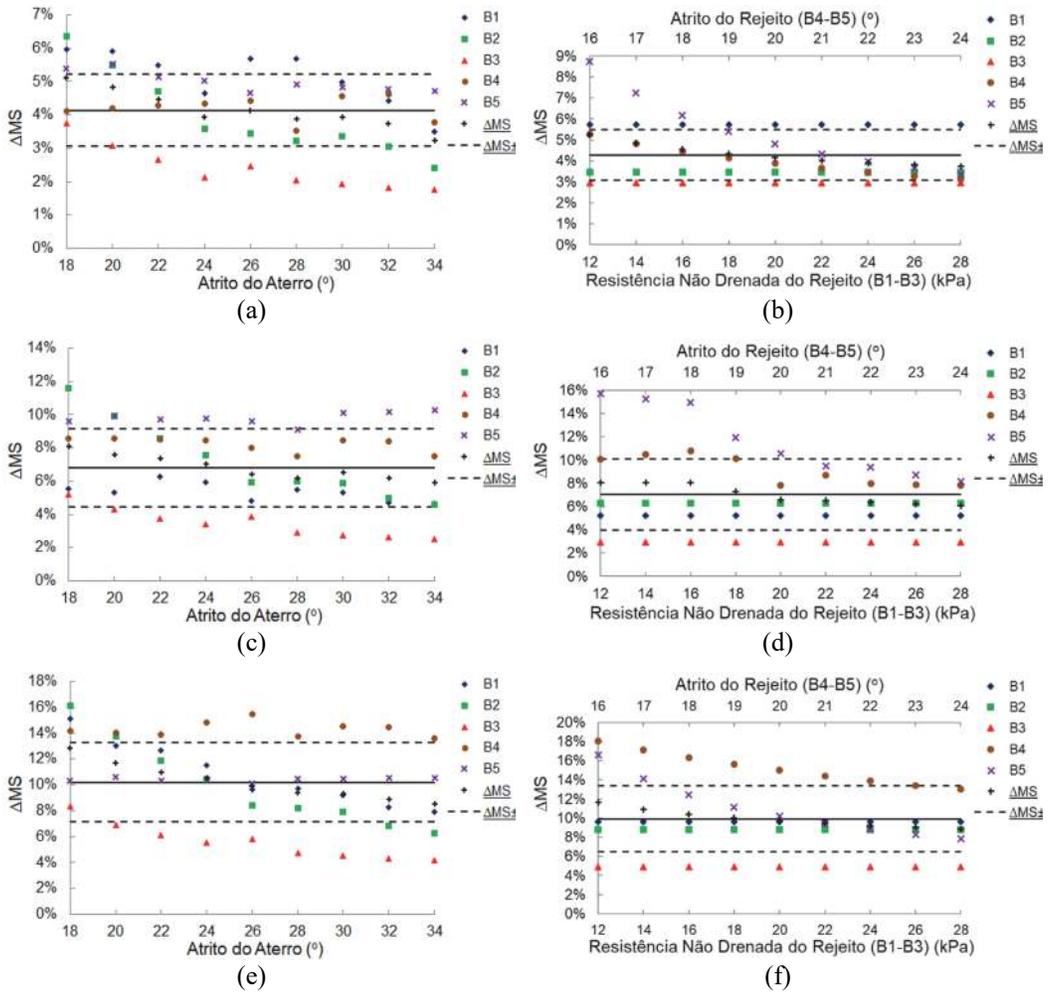


Fig. 4 – Influência de erosões de magnitude 1 (a-b), 2 (c-d) e 3 (e-f) na segurança de barragens (ΔMS) em função do atrito do aterro (a-c-e) e resistência do rejeito (b-d-f).

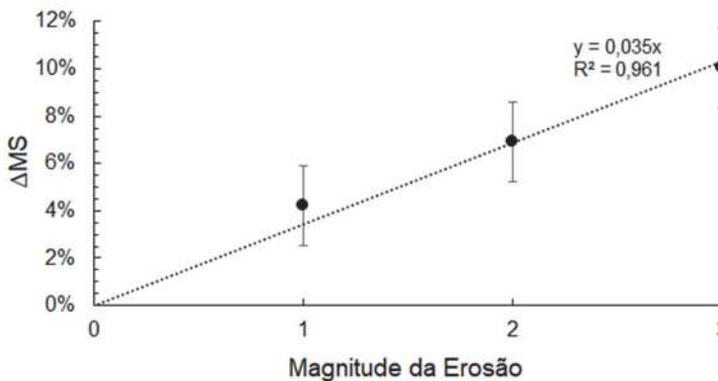


Fig.5 – Variação de ΔMS em função da magnitude das erosões.

Em termos médios, as erosões magnitude 1 resultaram em ΔMS em cerca de 4%, as erosões magnitude 2 em cerca de 7% e as erosões magnitude 3 em cerca de 12%, mostrados na tendência da Figura 5. Esse resultado foi coerente tanto na variação do atrito do aterro quanto na variação dos parâmetros de resistência do rejeito.

O ajuste linear da Figura 5 demonstra que existe uma proporcionalidade entre a magnitude das erosões e a perda relativa da margem de segurança, com um coeficiente de correlação de 96%. Além disso, verifica-se que o ajuste linear se situa dentro dos limites do erro padrão (calculado em 1,6% para mais ou para menos) em qualquer magnitude avaliada, também indicando um ajuste satisfatório do modelo.

4.2 – Influência de Trincas na Segurança de Barragens

A influência de trincas sobre a segurança de barragens é mostrada na Figura 6, sendo trincas de pequena magnitude (a-b), média magnitude (c-d) e grande magnitude (e-f).

Em contraste ao verificado para as erosões, para as trincas é observada uma maior dispersão dos resultados, ou seja, um grande número de resultados de análises fora dos limites de desvio padrão.

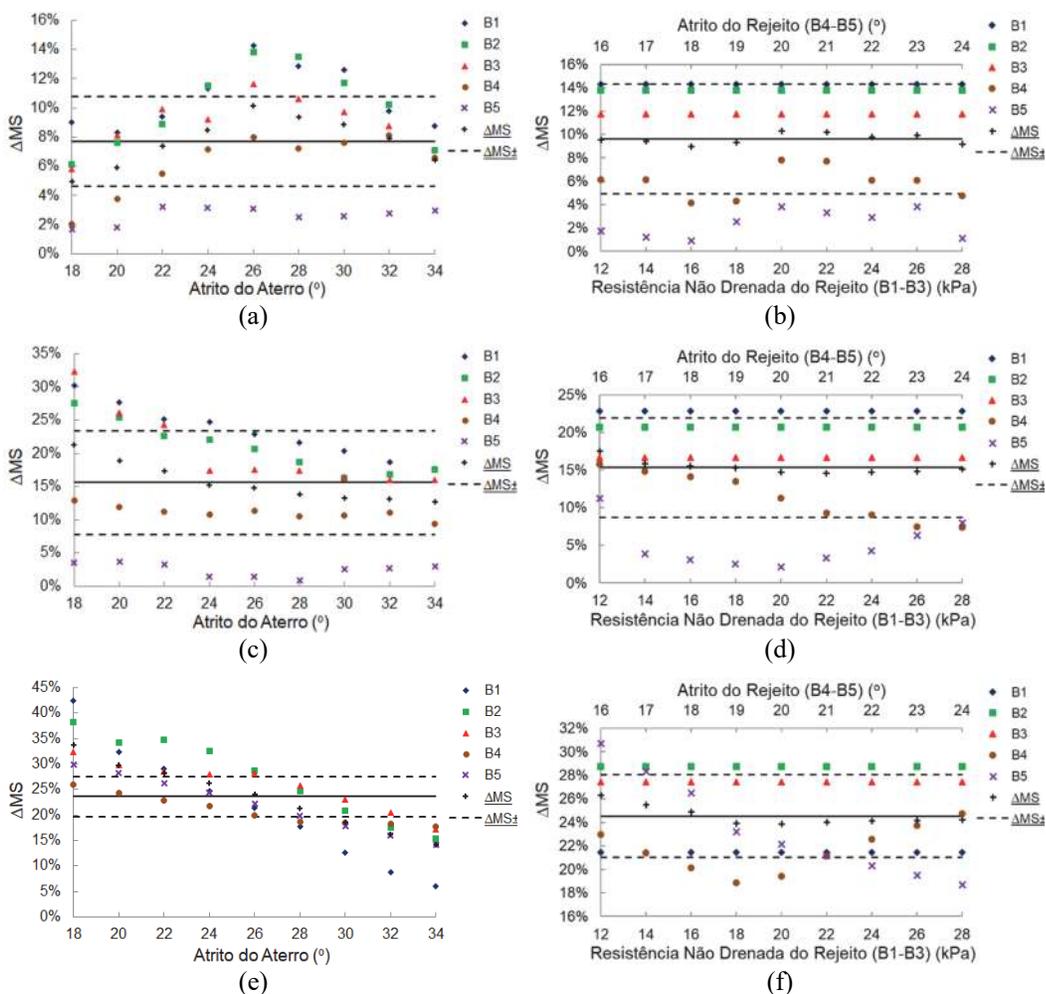


Fig.6 – Influência de trincas de magnitude 1 (a-b), 2 (c-d) e 3 (e-f) na segurança de barragens (ΔMS) em função do atrito do aterro (a-c-e) e resistência do rejeito (b-d-f).

De qualquer forma, verifica-se que a maior parte das análises ficaram dentro dos limites de desvio padrão (159 dentro dos limites contra 111 fora dos limites). Destaca-se a dispersão para as análises considerando trincas de grande magnitude com variação do atrito do aterro (Figura 6-e), onde verifica-se uma variação de ΔMS entre 6% e 43%.

Assim como o observado para erosões, a tendência de valores de ΔMS para trincas de médio e grande porte são maiores para os menores os ângulos de atrito do aterro (Figura 6-c-e). Já para trincas de pequeno porte (Figura 6-a), verifica-se que os maiores valores de ΔMS foram obtidos para ângulos de atrito de aterro intermediários. Por outro lado, como esperado, não é verificada variação significativa de ΔMS com a variação da resistência não drenada do rejeito (Figura 6-b-d-f) nas barragens B1, B2 e B3, indicando que as superfícies de ruptura interceptaram as trincas e não propagaram até o reservatório. Já nas barragens B4 e B5, alteadas a montante, é verificada uma grande amplitude de resultados de ΔMS com a variação do ângulo de atrito do rejeito, porém sem uma tendência definida.

Avaliando-se isoladamente para as barragens propostas, observa-se uma clara convergência para maiores de ΔMS para as barragens B1, B2, B3, B4 e B5 (Figura a-b-c-d-e), nesta ordem, indicando que, de modo geral, as trincas afetam mais gravemente a segurança das barragens de pequeno porte. A exceção dessa tendência foi verificada apenas para trincas de grande porte com a variação dos parâmetros de resistência do rejeito (Figura 6-f), onde os maiores valores de ΔMS foram obtidos para as barragens B2 e B3.

Observa-se que existe uma coerência de valores médios de ΔMS em função da magnitude da trinca, ou seja, independente se a análise é em relação à variação do atrito do aterro ou dos parâmetros de resistência do rejeito. Em termos médios, as trincas magnitude 1 resultaram em ΔMS em cerca de 9%, as erosões magnitude 2 em cerca de 15% e as erosões magnitude 3 em cerca de 24%, mostrados na tendência da Figura 7.

Assim como o observado para as análises de erosões, o ajuste linear da Figura 7 comprova que existe uma proporcionalidade entre a magnitude de trincas e a perda relativa da margem de segurança. Neste caso, o coeficiente de determinação foi de 99% e os resultados médios para qualquer magnitude de trinca avaliada ficaram dentro dos limites do erro padrão (calculado em 4,5% para mais ou para menos), indicando um ajuste satisfatório do modelo. Por esse modelo, as trincas de pequeno, médio e grande portes resultariam na perda relativa de segurança de 8%, 16% e 24%, respectivamente.

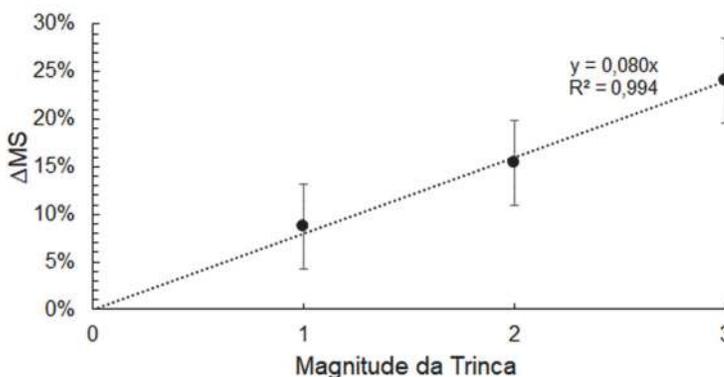


Fig. 7 – Variação de ΔMS em função da magnitude das trincas.

4.3 – Efeito Combinado de Trincas e Erosões na Segurança de Barragens

O efeito combinado de erosões e trincas sobre a segurança de barragens é mostrado na Figura 8, sendo a combinação de erosões trincas de pequena magnitude (a-b), média magnitude (c-d) e grande magnitude (e-f).

Observa-se, como esperado, que o efeito combinado de erosões e trincas aumentou o ΔMS para todas as barragens e todas as magnitudes simuladas, tanto para avaliações de modelos isolados quanto em termos médios. Observa-se também uma maior dispersão dos resultados de ΔMS em função da variação do atrito do aterro (Figura 8-a-c-e) em relação à dispersão ΔMS em função da variação dos parâmetros de resistência do rejeito (Figura 8-b-d-f).

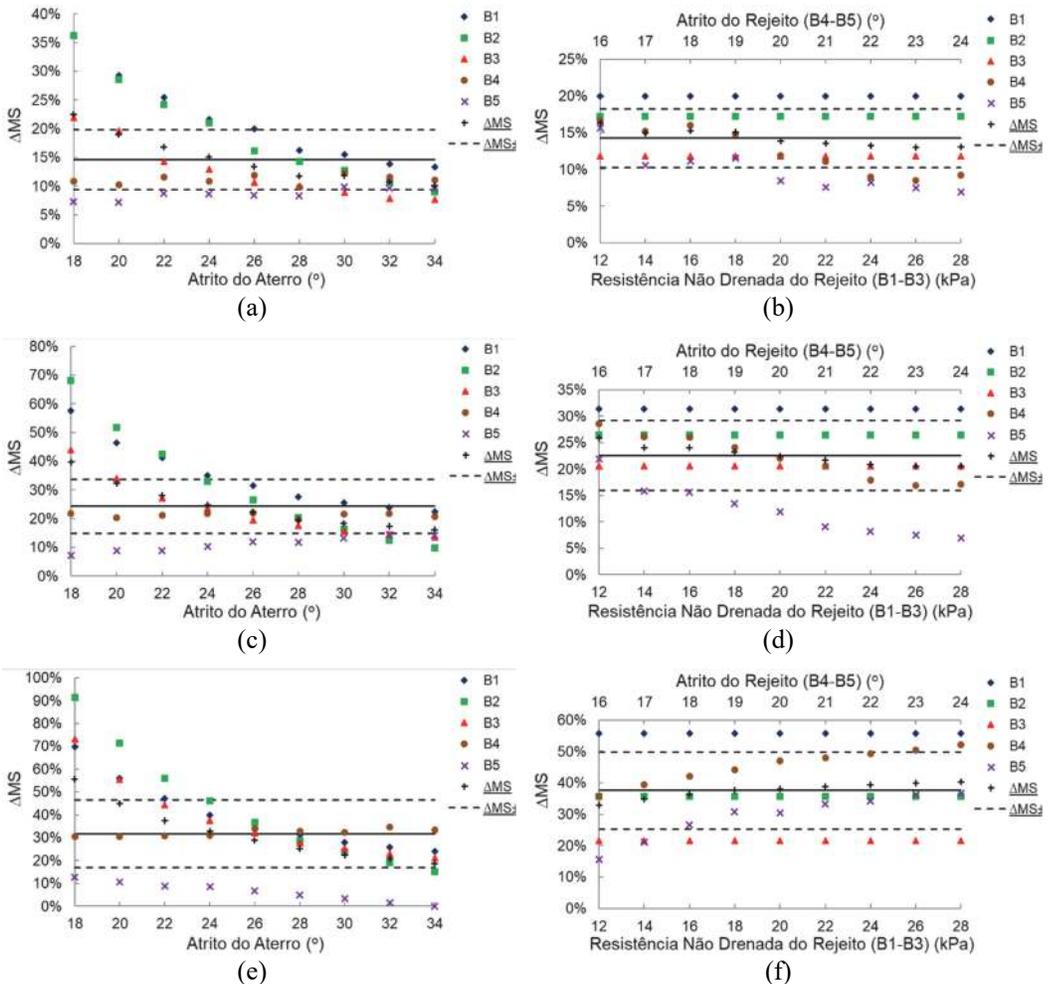


Fig. 8 – Efeito combinado de erosões e trincas de magnitude 1 (a-b), 2 (c-d) e 3 (e-f) sobre ΔMS em função do atrito do aterro (a-c-e) e resistência do rejeito (b-d-f).

Assim como o observado nas simulações de trincas (Figura 6), verifica-se para o efeito combinado de trincas e erosões que existe uma tendência de diminuição de ΔMS em função do aumento dos ângulos de atrito do aterro nas barragens alteadas a jusante (Figura 8-a-c-e). Já para as barragens alteadas a montante, verifica-se que não há grandes variações de ΔMS em função dos

parâmetros de resistência do aterro ou do rejeito. Isso pode indicar que o efeito combinado de erosões e trinças é agravado em barragens que empregam solos com baixo ângulo de atrito em seus aterros.

Nas avaliações isoladas dos modelos de barragens propostos, observa-se maiores valores de ΔMS para as barragens B2, B1, B3, B4 e B5 (nesta ordem) em função da variação do atrito do aterro (Figura 8-a-c-e), assim como maiores valores de ΔMS para as barragens B1, B2, B4, B3 e B5 (nesta ordem) em função da variação dos parâmetros de resistência do rejeito (Figura 8-b-d-f). Desta forma é possível afirmar que as barragens de menor porte têm sua segurança mais afetada por trinças e erosões quando comparadas às barragens de maior porte.

Avaliando-se os valores médios, tem-se os seguintes valores de ΔMS para combinações de trinças e erosões: 15% e 14% (Figura 8-a-b) para magnitude 1; 24% e 23% (Figura 8-c-d) para magnitude 2; e 32% e 29% (Figura 8-e-f) para magnitude 3. Esses resultados médios podem ser visualizados mostrados na Figura 9, que também mostra o ajuste ao se considerar a soma simples de ΔMS das análises isoladas de trinças e erosões.

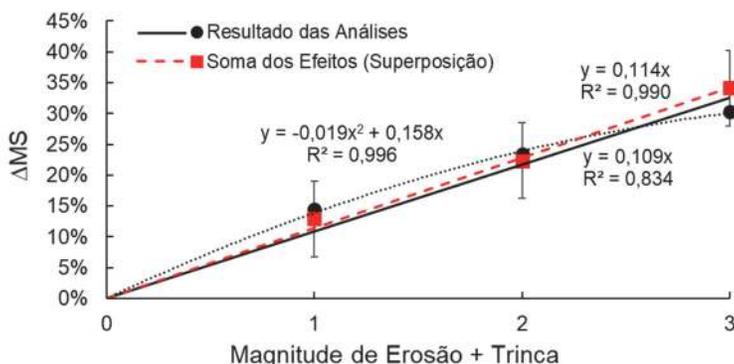


Fig. 9 – Variação de ΔMS em função do efeito combinado de erosões e trinças.

Verifica-se uma proporcionalidade nos ajustes lineares da Figura 9 entre a magnitude combinada de trinças e erosões e a perda relativa da margem de segurança. A confiabilidade da modelagem pode ser constatada ao observar que os resultados médios ficaram dentro dos limites do erro padrão, tanto para os resultados das análises combinadas de erosões e trinças (linha contínua) quanto para a soma dos valores de ΔMS das análises isoladas de erosões e trinças (linha tracejada).

Observa-se ainda na Figura 9 que o ajuste linear considerando a soma simples dos efeitos de trinças e erosões obtiveram um coeficiente de determinação de 99% ante um coeficiente de determinação de 83% para o ajuste linear das análises simulando essas anomalias combinadas. Dessa forma, foi testado o ajuste de 2º grau (linha pontilhada) para as análises de anomalias combinadas, no qual verificou-se um coeficiente de determinação de 99%. O valor negativo do coeficiente $0,019x^2$ desse ajuste sugere que o efeito de anomalias de grande porte combinadas resultaria em ΔMS ligeiramente inferiores se comparados à soma simples de ΔMS quando soma-se os efeitos isolados de erosões e trinças.

Por outro lado, como a diferença observada entre o efeito combinado e a soma simples dos efeitos foi pequena (11,5% ante 14,5% para magnitude 1; 23,0% ante 23,5% para magnitude 2; e 34,5% ante 30,5% para magnitude 3), pode-se afirmar que é admissível presumir a validade de superposição dos efeitos. Desta forma, seria possível estabelecer uma forma expedita para avaliar o efeito de erosões e trinças sobre perda relativa da segurança de barragens através do simples levantamento dessas anomalias e soma de seus efeitos isolados.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível avaliar o efeito de erosões e trincas anômalias 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 através de análises em modelos computacionais, tanto para erosões quanto para trincas;

(2) Para as análises de erosões, 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 3,5%, 7,0% e 10,5% respectivamente para erosões de pequena, média e grandes magnitudes;

(3) Para as análises de trincas, apesar de uma maior dispersão dos resultados em relação as análises de erosões, a maioria dos resultados das simulações também se distribuíram dentro dos limites do desvio padrão, sendo verificado uma diminuição sobre a margem de segurança de aproximadamente 8%, 16% e 24% respectivamente para trincas de pequena, média e grandes magnitudes;

(4) Os ajustes lineares da perda relativa da margem de segurança em função da magnitude de anomalias foram satisfatórios: os resultados médios ficaram dentro dos limites de erro médio tanto para erosões quanto para trincas, enquanto o coeficiente de determinação foi de 96% para as erosões e 99% para as trincas;

(5) Demonstrou-se com um desvio aceitável que o efeito combinado de erosões e trincas sobre a perda relativa da margem de segurança pode ser tomado como a soma simples dos resultados para avaliações isoladas de erosões e trincas, comprovando-se a validade de superposição dos efeitos na averiguação da presença de mais de uma dessas anomalias;

(6) De forma geral, os resultados demonstraram que é possível estimar o efeito de erosões e trincas sobre a perda da margem de segurança de barragens, podendo ser aplicada em inspeções de rotina e análises em portfólio para avaliação de segurança de barragens, diminuindo-se assim a subjetividade do avaliador.

6 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – pelo apoio financeiro destinado ao projeto (processo APQ 01284-10).

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas (2017). Relatório de segurança de barragens 2016. ANA, Brasília, 225 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.

Brasil (2010). *Política Nacional de Segurança de Barragens, Lei no. 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Casa Civil – Subchefia para Assuntos Jurídicos, Brazil.

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.

- Duncan, J.M. (1996). *State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes*. Journal of Geotechnical Engineering, 122 (1): 577-596.
- 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
- Hariri-Ardebili, M.A. (2018). *Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31 (1): 806-831.
- 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 (1982). *Manual on Tailings Dams and Dumps*. Committee on Dam Safety, Bulletin 45, Paris.
- ICOLD – International Commission on Large Dams (1989). *Tailings Dam Safety*. Committee on Dam Safety, Bulletin 97, Paris.
- ICOLD – International Commission on Large Dams (2005). *Risk assessment in dam safety management: a reconnaissance of benefits, methods and current applications*. Committee on Dam Safety, Bulletin 130, Paris.
- ICOLD – International Commission on Large Dams (2009). *Dam safety management*. In: Proceedings of 23rd International Congress on Large Dams, Brasilia, Brazil.
- Jansen, R.B. (1983). *Dams and Public Safety*. US Government Printing Office, US Bureau of Reclamation, Denver, 332 p.
- 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.
- Silva, F. Lambe, T.W. Marr, W.A. (2008). *Probability and risk of slope failure*. Journal of Geotechnical Environmental Engineering, 134 (12): 1691-1699.
- USACE – United States Army Corps of Engineers (1992). *Guidelines for risk and uncertainty analysis in water resources planning*, v. 2. IWR Report 92-R-2. U.S. Army Corps of Engineers, Washington.
- Valenzuela, L. (2016). *Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile*. Obras y Proyectos, 19 (1): 6-22.
- Zhang, L.; Peng, M.; Chang D.; Xu Y. (2016). *Dam failure mechanisms and risk assessment*. John Wiley & Sons, Singapore, 476 p.