XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/48

Comparação entre Métodos Pseudo-Estáticos de Equilíbrio Limite e por Elementos Finitos para Barragens de Rejeito

Daniel Marangon Mendes do Nascimento
Engenheiro Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, danielmarangon0@gmail.com

Ingrid Belcavello Rigatto
Engenheira Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, ingridbrigatto@gmail.com

Talita Caroline Miranda
Professora do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

RESUMO: A norma ABNT NBR 13.028-2:2025 solicita estudos sísmicos sobre o projeto de uma barragem de rejeitos e resíduos e consolida fator de segurança mínimo associado à análise de estabilidade que considera os tremores de terra sobre a estrutura. Para obtenção desses parâmetros, alguns autores referenciam valores de acelerações sísmica para o território Brasileiro. Nesse artigo, comparou-se a estimativa de aceleração sísmica obtida pelo método de Cruz *et al*. (2022), pelos mapas de Assumpção *et al.* (2016) e do Manual da Eletrobrás (2003) em uma barragem hipotética localizada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Para extrapolar os valores encontrados para um tempo de retorno de 10.000 anos, referente a barragens com Dano Potencial Associado classificado como extremo, utilizou-se dos critérios de estimativa do Eurocode 8. Análises de equilíbrio limite pseudo-estáticas no software Slide2 realizaram a comparação entre fatores de segurança alcançados pelas três metodologias de estimativa de aceleração sísmica. Além dessas, foi executada uma análise complementar também pseudo-estática, mas por método dos elementos finitos (MEF) no software Plaxis 3D. Os resultados destacaram como a escolha do método de estimativa de aceleração sísmica e a metodologia para análise com influência sísmica afetaram o atestado de segurança e estabilidade da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Aceleração sísmica, Pseudo-estática, Equilíbrio Limite, Método dos Elementos Finitos, Sismo, Barragens.

ABSTRACT: The ABNT NBR 13.028-2:2025 standard requires seismic studies for tailings and waste dam designs, establishing a minimum factor of safety associated with stability analyses that account for earthquake effects on the structure. To determine these parameters, several authors reference seismic acceleration values for the Brazilian territory. This paper compares the seismic acceleration estimates obtained through the method of Cruz et al. (2022), the hazard maps of Assumpção et al. (2016), and the Eletrobrás Manual (2003) for a hypothetical dam located in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. To extrapolate the obtained values to a 10,000-year return period corresponding to dams with an 'Extreme' Associated Potential Damage classification estimation criteria from Eurocode 8 were utilized. Pseudo-static limit equilibrium analyses performed in Slide2 software compared the factors of safety achieved by the three seismic acceleration estimation methodologies. Additionally, a complementary pseudo-static analysis was conducted using the finite element method (FEM) in Plaxis 3D software. The results highlight how the choice of both the seismic acceleration estimation method and the seismic analysis methodology impact the safety and stability certification of the dam.

KEYWORDS: Seismic acceleration, Pseudo-static, Limit equilibrium, Finite element method, Seismic loading, Dams.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeito desempenham papel fundamental na atividade minerária brasileira, porém configuram estruturas de elevado potencial de dano em caso de falha. Após os eventos de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, houve intensificação do rigor regulatório e revisão dos critérios de segurança aplicáveis a essas estruturas, incluindo a obrigatoriedade de avaliação da estabilidade sob ações sísmicas.

Embora o território brasileiro seja caracterizado por baixa sismicidade intraplaca, a ocorrência de eventos sísmicos não é nula (Assumpção *et al*., 2016). Assim, a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução nº 95/2022, estabelece que estudos sísmicos devem ser conduzidos conforme a ABNT NBR 13.028-2:2025, a qual, por sua vez, recomenda a adoção dos critérios da Canadian Dam Association (CDA, 2007) para definição do tempo de retorno do evento sísmico de projeto.

Para barragens classificadas com Dano Potencial Associado (DPA) extremo, a CDA recomenda a consideração de eventos com tempo de retorno da ordem de 10.000 anos ou o Máximo Sismo Credível (MCE). Contudo, a normativa brasileira não define explicitamente qual metodologia probabilística deve ser adotada para estimativa da aceleração sísmica associada a esse tempo de retorno. Como consequência, diferentes abordagens podem ser utilizadas para determinação do Pico de Aceleração do Solo (Peak Ground Acceleration – PGA), resultando em valores distintos de coeficientes sísmicos horizontais (K_h) e verticais (K_v).

No contexto brasileiro, destacam-se três abordagens frequentemente utilizadas:

(i) os valores fixos recomendados no Manual da Eletrobrás (2003);

(ii) os mapas probabilísticos de ameaça sísmica propostos por Assumpção *et al.* (2016);

(iii) a metodologia de correção proposta por Cruz *et al.* (2022), baseada em ajustes aos mapas de Assumpção *et al.* (2016).

Além da variabilidade associada à estimativa do PGA, a interpretação da estabilidade estrutural também depende do método numérico empregado. As análises pseudo-estáticas tradicionalmente utilizam métodos de equilíbrio limite (LEM), que impõem condições de equilíbrio global à massa potencialmente instável. Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) permite avaliar redistribuições progressivas de tensões e deformações, podendo resultar em interpretações distintas da condição de segurança.

Dessa forma, duas fontes principais de variabilidade emergem na avaliação sísmica de barragens de rejeito no Brasil:

1. A metodologia probabilística adotada para estimativa do PGA;
2. O método numérico utilizado para cálculo do fator de segurança.

Essa dupla variabilidade pode conduzir a conclusões distintas quanto à estabilidade de uma mesma estrutura, mesmo quando analisada sob idêntico enquadramento normativo e tempo de retorno.

O presente trabalho tem como objetivo comparar, para uma barragem hipotética localizada no Quadrilátero Ferrífero (MG), os fatores de segurança obtidos a partir de diferentes metodologias de estimativa de PGA — Manual da Eletrobrás (2003), Assumpção *et al.* (2016) e Cruz *et al.* (2022) — aplicadas em análises pseudo-estáticas conduzidas tanto pelo método do equilíbrio limite - software Slide2 (Rocscience, 2023) - quanto pelo método dos elementos finitos - software Plaxis 3D (Bentley, 2023).

O estudo não tem por objetivo estabelecer qual metodologia é mais adequada, mas evidenciar a sensibilidade dos resultados às hipóteses probabilísticas e ao método numérico empregado. Ao explicitar essa variabilidade, pretende-se contribuir para a discussão sobre consistência metodológica na aplicação da ABNT NBR 13.028-2:2025 e dos critérios da CDA em barragens de rejeito brasileiras.

2 METODOLOGIA

Para definição dos coeficientes sísmicos adotados nas análises pseudo-estáticas, foi estimado o PGA correspondente ao tempo de retorno de 10.000 anos, conforme critérios da CDA (2007) para barragens classificadas como DPA extremo.

De acordo com a CDA (2007), o dano potencial associado (DPA) à estrutura é utilizado como critério para definição do tempo de retorno adotado na estimativa do PGA. Dessa forma, barragens classificadas como de categoria “Extrema” devem ser avaliadas considerando um PGA associado a um período de retorno de 10.000 anos, ou ao evento MCE, conforme apresentado na Tabela 1.

Ressalta-se que a extrapolação para tempos de retorno superiores aos disponibilizados nos mapas probabilísticos envolve incertezas inerentes ao ajuste da curva de ameaça sísmica. Entretanto, a utilização da formulação do Eurocode 8 é prática consolidada em estudos de engenharia quando inexistem mapas regionais específicos para o tempo de retorno requerido. Neste estudo, o procedimento foi adotado com o objetivo de manter coerência metodológica e permitir a comparação entre abordagens sob o mesmo critério normativo.

Tabela 1. Níveis de risco de abalos sísmicos e seus respectivos tempos de retorno.

Classificação (nota 1)	**Probabilidade de excedência anual - Cheias (nota 2)**	**Probabilidade de Excedência anual - Sismos (nota 3)**
Baixa	1/100	1/100
Significativa	Entre 1/100 e 1/1.000 (nota 4)	Entre 1/100 e 1/1.000
Alta	1/3 entre 1/1.000 e PMF* (nota 5)	1/2.475 (nota 6)
Muito Alta	2/3 entre 1/1.000 e PMF* (nota 5)	1/2 entre 1/2.475 e 1/10.000 ou MCE* (nota 5)
Extrema	**PMF* (nota 5)**	**1/10.000 ou MCE* (Nota 5)**

*PMF – máxima cheia provável; MCE – maior sismo credível; AEP – probabilidade de excedência anual.
1 - Como definido na tabela de Classificação de Barragem;
2 - Simples extrapolação das estatísticas de cheias além de 10-3 AEP não é aceitável;
3 - Valores médios do intervalo estimado nos níveis de AEP para terremotos devem ser usados;
4 - Selecionado com base na análise incremental de cheias, exposição, e consequência de falha;
5 - PMF e MCE não tem AEP associados;
6 - Esse nível foi escolhido para garantir compatibilidade com o estabelecido nas normas de construção canadenses.

Fonte: *Canadian Dam Association* (2007)

2.1 Métodos de estimativa de PGA utilizados

Com o objetivo de estimar o valor do PGA correspondente ao período de retorno de 10.000 anos indicado na Tabela 1, foram empregadas três metodologias distintas, permitindo a comparação entre diferentes abordagens de avaliação do perigo sísmico. As estimativas foram realizadas com base nos procedimentos propostos pela Eletrobrás (2003), na metodologia apresentada por Cruz *et al.* (2022) e no modelo desenvolvido por Assumpção *et al.* (2016), os quais utilizam diferentes bases de dados sismológicas, relações de atenuação e critérios de regionalização sísmica. A adoção de múltiplos métodos possibilita uma análise mais abrangente das incertezas associadas à determinação do PGA.

O Manual da Eletrobrás (2003) define um par ordenado de aceleração de pico fixa, ou seja, uma aceleração horizontal (K_h) e uma aceleração vertical (K_v), com valores de 0,05g e 0,03g, respectivamente. Ressalta-se que o valor de K_v corresponde a 2/3 de K_h segundo Shannon e Wilson (1979), relação que será adotada para definir a aceleração vertical para as demais metodologias. Como este manual já indica as acelerações horizontais e verticais, pode-se estimar o valor PGA associado a estas acelerações por retroanálise. Sabe-se, pelo método de Hynes-Griffin e Franklin (1984), que o coeficiente K_h consiste na metade do PGA. Assim, estima-se que o PGA utilizado na lista da Eletrobrás (2003) seja de 0,10g.

Assumpção *et al.* (2016) elaboraram mapas probabilísticos de ameaça sísmica para o território brasileiro com base na relação magnitude-frequência de Gutenberg-Richter e em leis de atenuação empíricas. Os mapas apresentam estimativas de PGA em rocha para tempos de retorno de 475 e 2.475 anos, sendo necessária extrapolação para 10.000 anos.

Cruz *et al.* (2022) propuseram correção dos valores obtidos nos mapas de Assumpção *et al*. (2016), a partir de comparação com registros sísmicos monitorados, resultando em equação de ajuste aplicada neste estudo.

2.2 Hipóteses e Justificativas Metodológicas

A metodologia adotada neste estudo envolve simplificações e decisões técnicas que visam garantir coerência comparativa entre as diferentes abordagens analisadas. Essas escolhas não têm como objetivo reproduzir integralmente o comportamento real de uma barragem específica, mas permitir avaliação

consistente da influência da metodologia de estimativa da aceleração sísmica e do método numérico de análise sobre o fator de segurança obtido.

A extrapolação dos valores de PGA para o tempo de retorno de 10.000 anos foi realizada com base na formulação proposta pelo Eurocode 8 (Comité Européen de Normalisation, 2004), uma vez que os mapas probabilísticos de Assumpção *et al.* (2016) contemplam apenas tempos de retorno de 475 e 2.475 anos. Reconhece-se que extrapolações para períodos elevados envolvem incertezas associadas ao ajuste da curva de ameaça sísmica; contudo, na ausência de mapas regionais específicos para o tempo de retorno requerido, a aplicação da relação recomendada pelo Eurocode constitui prática consolidada em estudos de engenharia. O valor do coeficiente de ponderação k=0,4 foi adotado dentro do intervalo recomendado ($0,3 \leq k \leq 0,4$), representando a condição mais conservadora para eventos de alta recorrência, compatível com o enquadramento da barragem como DPA extremo.

A fundação foi modelada com resistência infinita (*Infinite Strength*) com o propósito de concentrar a análise no comportamento do maciço do barramento sob ação sísmica. A inclusão de parâmetros geotécnicos da fundação introduziria variáveis adicionais que poderiam influenciar a superfície crítica de ruptura, desviando o foco do estudo, que consiste na comparação entre metodologias de estimativa de PGA e métodos numéricos de análise. Dessa forma, a simplificação adotada permitiu isolar a influência da ação sísmica no corpo da barragem.

O modelo constitutivo de Mohr-Coulomb (Terzaghi e Peck, 1962) foi selecionado por sua ampla aplicação em análises de estabilidade e por permitir compatibilidade direta com os parâmetros utilizados no método do equilíbrio limite. Modelos constitutivos avançados, como Hardening Soil (Shanz *et al*., 1999), incorporam dependência da rigidez em função do estado de tensões e poderiam alterar a redistribuição interna de esforços; entretanto, sua adoção introduziria variáveis adicionais não essenciais ao objetivo comparativo do presente trabalho.

As análises foram conduzidas sob abordagem pseudo-estática, não sendo realizada análise dinâmica no domínio do tempo. A modelagem dinâmica requer registros acelerográficos representativos da região, bem como parâmetros dinâmicos específicos dos materiais, tais como curvas de degradação de módulo e amortecimento, os quais não estavam disponíveis para o caso analisado. A abordagem pseudo-estática é amplamente empregada em avaliações preliminares de estabilidade sísmica de barragens e permite comparação direta entre métodos numéricos distintos sob um mesmo conjunto de coeficientes inerciais equivalentes.

Por fim, ressalta-se que as hipóteses adotadas foram estabelecidas de modo a manter consistência entre os cenários analisados, permitindo avaliar a sensibilidade do fator de segurança à escolha da metodologia de estimativa de PGA e ao método de cálculo da estabilidade, sem introdução de variáveis externas que comprometessem a comparabilidade dos resultados.

3 APLICAÇÃO E ESTUDO DE CASO

Para avaliação comparativa das metodologias de estimativa de aceleração sísmica e dos métodos numéricos de análise de estabilidade, foi considerada uma barragem hipotética localizada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. A estrutura foi enquadrada na condição de Dano Potencial Associado (DPA) extremo, adotando-se, conforme critérios da Canadian Dam Association (CDA, 2007) e da ABNT NBR 13.028-2:2025, tempo de retorno de 10.000 anos para o evento sísmico de projeto.

A barragem analisada possui aproximadamente 41,5 m de altura entre a crista e o contato com a fundação. O talude de jusante apresenta inclinação de 2H:1V, com quatro bermas intermediárias. O reservatório de rejeito foi considerado com nível 1,0 m abaixo da crista, mantendo borda livre, e o nível d'água foi definido a 4,0 m abaixo da crista da barragem. A estratigrafia foi simplificada em três domínios materiais: maciço de aterro, rejeito e fundação. Conforme estabelecido na metodologia, a fundação foi modelada com resistência infinita (*Infinite Strength*), de modo a concentrar a análise no comportamento do corpo do barramento sob ação sísmica. A seção geotécnica representativa utilizada nas análises é apresentada na Figura 1.

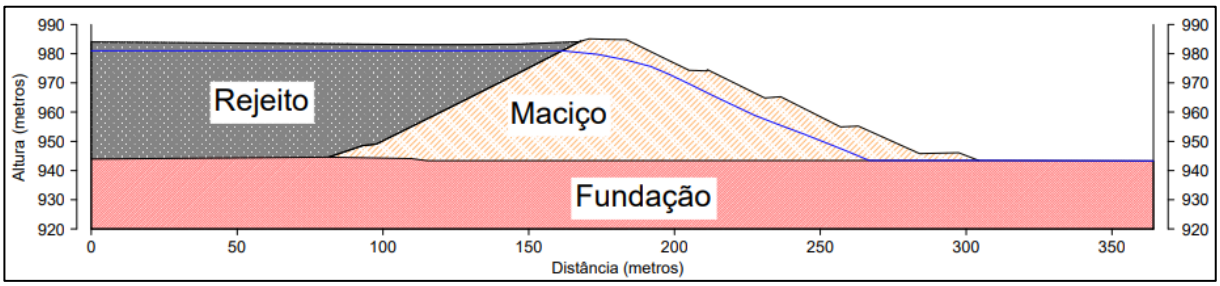


Figura 1. Seção da barragem analisada.

Os materiais foram modelados segundo o critério de Mohr-Coulomb, adotando-se parâmetros compatíveis com barragens de rejeito da região de estudo. Os valores utilizados nas análises estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros adotados dos materiais.

Material	**Cor**	**Método de análise**	**γ_{nat} (kN/m³)**	**c' (kN/m²)**	**ϕ' (º)**	**E (kPa)**	**υ**
Maciço		Mohr-Coulomb	18	5	29	22.000	0,30
Rejeito		Mohr-Coulomb	20	2	30	1.000	0,40
Fundação		Infinite Strength	20	-	-	100.000	0,35

A adoção de parâmetros homogêneos para cada domínio material teve como finalidade manter consistência entre os diferentes cenários sísmicos analisados, evitando a introdução de variáveis adicionais que comprometessem a comparação entre metodologias.

Os coeficientes pseudo-estáticos horizontais (K_h) e verticais (K_v) foram obtidos conforme descrito na seção anterior, a partir das três abordagens consideradas: Manual da Eletrobrás (2003), Assumpção *et al.* (2016) e Cruz *et al.* (2022). Após extrapolação do PGA para o tempo de retorno de 10.000 anos, quando aplicável, e conversão para coeficientes inerciais equivalentes, foram adotados os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Estimativa de PGA para TR de 10.000 anos e os respectivos coeficientes verticais e horizontais.

Metodologia	**PGA (TR 10.000 anos)**	**K_h**	**K_v**
Eletrobrás (2003)	-	0,05 g	0,03 g
Assumpção *et al*. (2016)	0,21 g	0,11 g	0,07 g
Cruz *et al*. (2022)	0,15 g	0,08 g	0,05 g

Observa-se que a metodologia baseada nos mapas de Assumpção *et al.* (2016), após extrapolação para 10.000 anos, resultou no maior valor de aceleração, enquanto o método de Cruz *et al.* (2022) apresentou valor intermediário e o Manual da Eletrobrás (2003) manteve valores fixos inferiores.

As análises por equilíbrio limite foram conduzidas no software Slide2, utilizando o método de Morgenstern-Price (GLE) com busca automática de superfícies de ruptura não circulares. O fator de segurança foi definido como a razão entre forças resistentes e forças solicitantes, considerando a aplicação direta dos coeficientes pseudo-estáticos como forças inerciais equivalentes.

As análises por método dos elementos finitos foram realizadas no software Plaxis 3D, , empregando uma geometria extrudada representativa de uma seção bidimensional. O fator de segurança foi obtido por meio do método de redução progressiva da resistência (∑Msf), no qual os parâmetros de resistência são reduzidos até a ocorrência de instabilidade global.

Em todos os cenários analisados, manteve-se a mesma geometria, os mesmos parâmetros geotécnicos e as mesmas condições de contorno, variando-se exclusivamente os coeficientes sísmicos adotados e o método numérico empregado. Essa abordagem permitiu avaliar, de forma isolada, a influência da metodologia de estimativa de aceleração sísmica e da técnica de modelagem na determinação do fator de segurança da estrutura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de estabilidade foram conduzidas para os três conjuntos de coeficientes pseudo-estáticos apresentados anteriormente, utilizando tanto o método do equilíbrio limite (LEM) quanto o método dos elementos finitos (MEF). Os fatores de segurança obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Fatores de segurança obtidos das análises de estabilidade de acordo com a metodologia adotada.

Metodologia	**K_h**	**K_v**	**Fator de Segurança mínimo ABNT NBR 13.028-2:2025**	**Fator de Segurança (equilíbrio limite)**	**Fator de Segurança (MEF)**
Eletrobrás (2003)	0,05 g	0,03 g	1,10	1,20	1,07
Assumpção *et al*. (2016)	0,11 g	0,07 g	1,10	1,05	Ruptura
Cruz *et al*. (2022)	0,08 g	0,05 g	1,10	1,12	Ruptura

Observa-se, inicialmente, que os resultados são sensíveis à metodologia adotada para estimativa da aceleração sísmica. A aplicação dos coeficientes recomendados pelo Manual da Eletrobrás (2003) resultou nos maiores fatores de segurança em ambas as abordagens numéricas. Já a metodologia baseada nos mapas de Assumpção *et al.* (2016), após extrapolação para o tempo de retorno de 10.000 anos, conduziu ao cenário mais crítico.

No método do equilíbrio limite, apenas o cenário associado a Assumpção *et al.* (2016) apresentou fator de segurança inferior ao mínimo exigido pela ABNT NBR 13.028-2:2025 (FS ≥ 1,10). A metodologia de Cruz *et al.* (2022) resultou em valor ligeiramente superior ao limite normativo, enquanto o Manual da Eletrobrás (2003) indicou margem de segurança mais elevada.

Entretanto, ao se analisar os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, verifica-se comportamento mais conservador. Para os coeficientes derivados das metodologias de Assumpção *et al.* (2016) e Cruz *et al*. (2022), o modelo indicou ruptura da estrutura durante o processo de redução de resistência (∑Msf), não sendo possível obter fator de segurança superior à unidade. Mesmo no cenário da Eletrobrás (2003), o fator de segurança obtido pelo MEF foi inferior ao mínimo normativo, embora acima de 1,0.

A divergência entre os resultados obtidos por LEM e MEF decorre das diferenças conceituais entre os métodos. O equilíbrio limite impõe condições de equilíbrio global à massa potencialmente instável, avaliando a relação entre forças resistentes e solicitantes ao longo de uma superfície de ruptura previamente definida. Já o método dos elementos finitos permite redistribuição progressiva de tensões e deformações no interior do maciço, capturando o desenvolvimento de zonas plásticas antes da formação de um mecanismo de ruptura global. Dessa forma, o MEF tende a indicar instabilidade em situações nas quais o LEM ainda apresenta fator de segurança ligeiramente superior ao limite normativo.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que tanto a abordagem probabilística utilizada para definição do PGA quanto o método de modelagem numérica adotado exercem influência direta na interpretação da condição de segurança da estrutura.

Os resultados evidenciam que a interpretação da condição de segurança da barragem não depende exclusivamente do valor do PGA estimado, mas também do método numérico empregado na avaliação da estabilidade. Para um mesmo conjunto de coeficientes sísmicos, a escolha entre equilíbrio limite e elementos finitos pode conduzir a conclusões distintas quanto ao atendimento do critério normativo. Essa variabilidade metodológica torna-se particularmente relevante em estruturas classificadas como DPA extremo, nas quais pequenas diferenças nos coeficientes sísmicos ou na abordagem de modelagem podem alterar o enquadramento da estrutura quanto à necessidade de intervenções ou reavaliações complementares.

A extrapolação dos mapas probabilísticos de Assumpção *et al.* (2016) para o tempo de retorno de 10.000 anos, conforme recomendado pela CDA (2007) para estruturas de alto dano potencial, resultou nos maiores valores de aceleração e, consequentemente, nos cenários mais críticos de estabilidade. A metodologia de Cruz *et al*. (2022), ao propor correção dos valores estimados pelos mapas nacionais, apresentou condição intermediária, enquanto o Manual da Eletrobrás (2003), com valores prescritivos fixos, conduziu aos maiores fatores de segurança dentre os cenários analisados.

Esses resultados estão em consonância com a natureza probabilística da avaliação de ameaça sísmica, na qual incertezas associadas à frequência, magnitude e atenuação dos eventos influenciam diretamente os valores estimados de aceleração. Considerando as dimensões continentais do território brasileiro e a amplitude das zonas sísmicas definidas nos mapas nacionais, é esperado que existam incertezas inerentes à regionalização da ameaça sísmica, particularmente quando se realizam extrapolações para tempos de retorno elevados, como 10.000 anos.

Além da variabilidade associada ao PGA, observou-se diferença sistemática entre os fatores de segurança obtidos pelo método do equilíbrio limite e pelo método dos elementos finitos. O equilíbrio limite, fundamentado no balanço global entre forças resistentes e solicitantes ao longo de uma superfície potencial de ruptura, apresentou fatores de segurança superiores aos obtidos pelo método dos elementos finitos em todos os cenários avaliados. O método dos elementos finitos, por meio da redução progressiva da resistência (∑Msf), capturou redistribuições internas de tensões e indicou ruptura da estrutura em dois dos três conjuntos de coeficientes sísmicos analisados. Esse comportamento é compatível com a literatura clássica de estabilidade de taludes, que reconhece diferenças conceituais entre métodos baseados em equilíbrio global e métodos que consideram plastificação progressiva do maciço.

Os resultados demonstram que, para um mesmo enquadramento normativo e mesmo tempo de retorno, a interpretação da condição de segurança pode variar conforme a metodologia de estimativa do PGA e o método numérico empregado na análise. Em termos práticos, verificou-se que a combinação da metodologia de Cruz *et al.* (2022) com análise por equilíbrio limite resultou em fator de segurança superior ao mínimo exigido pela ABNT NBR 13.028-2:2025, enquanto a aplicação do mesmo conjunto de coeficientes em análise por elementos finitos indicou ruptura da estrutura. Tal constatação evidencia a sensibilidade do atestado de segurança às premissas adotadas.

A ABNT NBR 13.028-2:2025 recomenda a utilização dos critérios da CDA para definição do tempo de retorno do evento sísmico de projeto, porém não estabelece diretrizes específicas quanto à metodologia de estimativa do PGA nem quanto ao método numérico a ser empregado na análise pseudo-estática. Como consequência, diferentes profissionais podem adotar abordagens distintas para uma mesma estrutura, obtendo resultados divergentes mesmo sob o mesmo enquadramento regulatório.

Dessa forma, o estudo evidencia a importância de maior consistência metodológica na aplicação dos critérios sísmicos para barragens de rejeito no Brasil, especialmente em estruturas classificadas com elevado dano potencial associado. Tal consistência não implica uniformidade absoluta de resultados entre métodos distintos, mas requer transparência na definição das hipóteses adotadas e coerência entre o nível de risco da estrutura e os critérios de análise empregados.

Por fim, ressalta-se que as simplificações adotadas (como modelagem da fundação com resistência infinita, utilização do modelo constitutivo de Mohr-Coulomb e abordagem pseudo-estática) foram deliberadamente estabelecidas para permitir comparação controlada entre metodologias, não tendo como objetivo reproduzir integralmente o comportamento de uma barragem específica. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram que, mesmo sob hipóteses simplificadas, a escolha da metodologia de estimativa da aceleração sísmica e do método numérico de análise pode alterar substancialmente a interpretação da segurança estrutural frente a eventos sísmicos.

5 CONCLUSÃO

Portanto, os resultados obtidos indicam que, além da definição do tempo de retorno e da metodologia probabilística de estimativa do PGA, a consistência entre critérios de modelagem numérica assume papel decisivo na avaliação da estabilidade sísmica de barragens de rejeito. A ausência de diretrizes normativas específicas quanto à escolha do método de análise pode resultar em interpretações distintas da condição de segurança para uma mesma estrutura, ainda que sob o mesmo enquadramento regulatório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFMG pelo incentivo à produção científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028-2: Mineração - Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSUMPÇÃO, M. S.; DIAS, F. L.; ZEVALLOS, I.; NALIBOFF, J. B. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. Journal of South American Earth Sciences, v. 71, p. 278-295, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005.

BENTLEY SYSTEMS. Plaxis 3D Manual. Versão 2023. Disponível em: https://www.bentley.com/en/products/brands/plaxis. Acesso em: 20 fev. 2026.

CANADIAN DAM ASSOCIATION. Dam Safety Guidelines. Edmonton: Canadian Dam Association, 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. (ELETROBRÁS). Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2003.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 1998-1: Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

CRUZ, F. V. A. S.; FARIA, L. G.; MATARAZO, F. Y.; REIS, C. J.; SOUZA FILHO, M. J. Estimativa de pico de aceleração sísmica para barragens brasileiras, com extrapolação conforme Eurocode 8. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 8., 2022, Ipojuca. COBRAE, 2022.

HYNES-GRIFFIN, M. E.; FRANKLIN, A. G. Rationalizing the seismic coefficient method. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1984. (Miscellaneous Paper GL-84-13).

ROCSCIENCE. Slide2: 2D limit equilibrium slope stability software. Versão 9.038. Toronto: Rocscience Inc., 2023. Disponível em: https://www.rocscience.com. Acesso em: 20 fev. 2026.

SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. In: Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Rotterdam: Balkema, 1999.

SHANNON AND WILSON, INC.; AGBABIAN ASSOCIATES. Statistical analysis of earthquake ground motion parameters. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1979.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. Mecânica dos solos na prática da engenharia. Tradução de Antonio José da Costa Nunes e Maria de Lourdes Campos Campello. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.