DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/2

Análise Comparativa Multivariável de Métodos Analíticos para a Definição de Coeficientes Pseudo-Estáticos para Avaliações de Estabilidade

Jonathas Balbino
Engenheiro Civil, M.Sc., Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, jonathas.balbino@tetratech.com

Renan Campos
Engenheiro Civil, M.Sc., Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, renan.campos@tetratech.com

João Barbosa
Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, joao.barbosa@tetratech.com

Álvaro Nascimento
Engenheiro Geotécnico, VALE, Belo Horizonte, Brasil, alvaro.nascimento@vale.com

Marcos Borges
Engenheiro Geotécnico, PROGEN, Mariana, Brasil, c0675870@vale.com

RESUMO: A análise pseudo-estática, que aplica um coeficiente sísmico uniforme à massa deslizante, é amplamente usada para avaliar a estabilidade sísmica de barragens, mas tem limitações por não captar variações espaciais da resposta sísmica nem a transitoriedade dos picos de aceleração, podendo superestimar efeitos instabilizantes. Para superar essas restrições, incorporam-se métodos que relacionam parâmetros sísmicos ao comportamento dinâmico e aos deslocamentos permanentes: Bray e Travasarou (2009) (aceleração espectral no período degradado), Papadimitriou et al. (2014) (PGA em topo rochoso associado ao período de retorno) e Bray e Macedo (2019) (correlação entre deslocamentos permanentes e parâmetros sísmicos/geotécnicos). A determinação do deslocamento admissível geralmente recorre a casos históricos, classificações de danos e julgamento de engenharia pela escassez de dados empíricos em barragens de rejeito. A integração de normas, PSHA probabilística e múltiplas metodologias aumenta a robustez da avaliação, orientando critérios mais realistas para reabilitação e mitigação de riscos. O estudo aplica essas três metodologias a uma barragem de rejeito no Quadrilátero Ferrífero (MG) usando resultados locais de PSHA, permitindo comparação dos coeficientes e análises de sensibilidade quanto ao período fundamental, deslocamento admissível e velocidade de cisalhamento, visando oferecer base racional para prática técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem numérica, sismologia, dinâmica, barragens, engenharia sísmica.

ABSTRACT: Pseudo-static analysis, which applies a uniform seismic coefficient to the sliding mass, is widely used to assess the seismic stability of dams but has limitations because it does not capture spatial variations in seismic response nor the transience of acceleration peaks, and it can overestimate destabilizing effects. To overcome these constraints, methods that relate seismic parameters to dynamic behavior and permanent displacements are incorporated: Bray and Travasarou (2009) (spectral acceleration at the degraded period), Papadimitriou et al. (2014) (PGA at rock outcrop associated with a return period), and Bray and Macedo (2019) (correlation between permanent displacements and seismic/geotechnical parameters). Determination of allowable displacement generally relies on historical cases, damage classifications, and engineering judgement because of the scarcity of empirical data for tailings dams. Integration of standards, probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), and multiple methodologies increases the robustness of the assessment, guiding more realistic criteria for rehabilitation and risk mitigation. This study applies these three methodologies to a tailings dam in the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) using local PSHA results, allowing comparison of coefficients and sensitivity analyses with respect to fundamental period, allowable displacement and shear-wave velocity, with the aim of providing a rational basis for technical practice.

KEYWORDS: Numerical modeling, seismology, dynamics, dams, seismic engineering.

1 INTRODUÇÃO

A análise pseudoestática é tradicionalmente empregada para avaliar a estabilidade sísmica de barragens, utilizando métodos de equilíbrio limite com aplicação de um coeficiente sísmico (k) uniforme à massa deslizante potencial. Essa abordagem apresenta limitações, pois não considera a variação espacial da resposta sísmica nem a transitoriedade dos picos de aceleração, podendo superestimar os efeitos instabilizantes. No entanto, a abordagem pseudoestática é relativamente simples e direta e é uma ferramenta rotineira utilizada por engenheiros geotécnicos para simplificar os cálculos e tornar a compreensão mais fácil. É importante destacar que a precisão da abordagem pseudoestática é governada pela fidelidade com que as forças inerciais pseudoestáticas simples representam as complexas forças dinâmicas que realmente atuam durante um terremoto (KRAMER, 1996). Para aprimorar a avaliação do desempenho sísmico, diversas metodologias vêm sendo incorporadas à prática de engenharia, destacando-se os métodos de Bray e Travasarou (2009), que utilizam a aceleração espectral no período degradado da massa deslizante; Papadimitriou et al. (2014), que propõem o uso do PGA em topo rochoso associado ao período de retorno; e Bray e Macedo (2019), que correlacionam deslocamentos permanentes com parâmetros sísmicos e geotécnicos.

A definição do deslocamento admissível das estruturas após um evento sísmico é um aspecto central, geralmente fundamentado em casos históricos, sistemas de classificação de danos e julgamento de engenharia, devido à escassez de dados empíricos para barragens de rejeito. A integração entre critérios normativos, análise probabilística de perigo sísmico e múltiplas metodologias de avaliação de desempenho proporciona maior robustez à análise de estabilidade sísmica. Esse avanço metodológico contribui para a definição de critérios mais realistas e seguros no contexto de projetos de descaracterização e reabilitação de barragens, promovendo a mitigação de riscos e a segurança das estruturas frente a eventos sísmicos.

O estudo proposto utiliza as informações de uma barragem de rejeito de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, em conjunto com respectivos resultados do estudo de Ameaça Sísmica Probabilística Local (PSHA), para aplicar as três metodologias destacadas. O desenvolvimento do trabalho permite que os coeficientes obtidos sejam comparados entre eles, mas também garante a condução de uma série de avaliações de sensibilidade relativas às variáveis de cálculo envolvidas, dentre as quais destacam-se o período fundamental da estrutura, o deslocamento admissível, a magnitude do evento sísmico, a velocidade de onda cisalhante dos materiais, além da espessura e rigidez da camada de solo da fundação. Com os resultados, espera-se contribuir para a literatura técnica com uma base racional de aplicação dos três métodos, incluindo o entendimento das variáveis que demandam maior nível de robustez em sua investigação e determinação.

2 ABORDAGEM PSEUDOESTÁTICA E VARIÁVEIS

As análises pseudoestáticas, baseadas no método do equilíbrio limite, são amplamente utilizadas para avaliar a estabilidade de barragens sob solicitações sísmicas. Sua aplicação requer a adequada caracterização das condições geológicas, hidráulicas, topográficas, geométricas e geotécnicas do empreendimento, das quais depende a confiabilidade dos resultados.

Nesse contexto, metodologias recentes, como as propostas por Bray e Travasarou (2009), Papadimitriou et al. (2014) e Bray e Macedo (2019), incorporam explicitamente parâmetros geométricos da estrutura, variáveis sísmicas derivadas da caracterização do perigo sísmico regional e critérios de desempenho associados ao deslocamento permanente.

As metodologias analisadas neste trabalho têm como base conceitual comum a teoria do bloco deslizante, um modelo simplificado que representa mecanicamente o deslocamento permanente induzido por solicitações sísmicas, associado à deformação por cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura. A estabilidade dinâmica da estrutura é caracterizada a partir da aceleração crítica (a_c ou k_y), definida como a aceleração mínima do solo necessária para superar a resistência ao deslizamento basal e iniciar o movimento da massa (JIBSON, 2007). Quando um bloco sobre um plano inclinado é submetido a uma sequência de pulsos de aceleração que excedem a aceleração crítica, ocorre o início do movimento, caracterizado pelo desenvolvimento de velocidade e pelo acúmulo progressivo de deslocamentos permanentes (KRAMER, 1996).

A estimativa do coeficiente sísmico horizontal, nesse contexto, depende de variáveis que representam predominantemente a demanda sísmica, a geometria da estrutura e os critérios de desempenho adotados. De

forma sintética, as metodologias avaliadas consideram esses efeitos por meio das variáveis apresentadas na Tabela 1, as quais foram agrupadas, neste trabalho, em função da demanda sísmica, da geometria e do desempenho estrutural.

Tabela 1. Variáveis de entrada para estimativa do coeficiente sísmico horizontal.

Metodologia	Demanda Sísmica	Geometria	Desempenho	Fórmula
Bray e Travasarou (2009)	S_a, M	T_s, V_s	D_a, ε	$k = e^{\frac{-a+\sqrt{b}}{0,665}}$
Papadimitriou et al. (2014)	PGA_{rock}, T_e	T, T_{0e},T_0, V_b, H_b, z, t, w, H	D_{all}	$k_{hE} = k_{hmax}/q$
Bray e Macedo (2019)	S_a, M	T_s, V_s	D_a, ε	$k = e^{\frac{-a+\sqrt{b}}{0,49}}$

Legenda: S_a: aceleração espectral horizontal; M: magnitude de momento do sismo; T_0 e T_s: período fundamental da massa da superfície potencial de ruptura; D_a e D_{all}: deslocamento máximo admitido; ε: variável aleatória que quantifica a probabilidade de excedência; PGA_{rock}: Peak Ground Acceleration na rocha; T_e: período predominante do sismo; T_{0e}: período fundamental elástico; V_b: velocidade de cisalhamento da fundação em solo; H_b: espessura da fundação em solo; z: altura entre entrada e saída da massa da superfície potencial de ruptura; t: espessura da massa da superfície potencial de ruptura; w: largura da massa da superfície potencial de ruptura; k: coeficiente sísmico; a e b: constantes de regressão do modelo; k_{hE}: coeficiente sísmico efetivo; k_{hmax}: coeficiente sísmico máximo; e q: fator de deslizamento.

Embora as metodologias destacadas tenham como objetivo a definição do coeficiente sísmico horizontal, elas diferem quanto aos parâmetros de entrada adotados e, principalmente, quanto à abordagem metodológica empregada. Bray e Travasarou (2009) propõem uma abordagem probabilística baseada em regressões empíricas calibradas a partir de uma base de dados composta por 688 pares de componentes horizontais de registros sísmicos do solo. Nessa metodologia, o deslocamento permanente é modelado como uma variável aleatória e expresso em função do coeficiente de escoamento do sistema, do período fundamental, da magnitude de momento do sismo e da aceleração espectral. Bray e Macedo (2019) adotam a mesma estrutura conceitual, porém com maior robustez estatística, a partir da ampliação significativa da base de dados para 6711 pares de componentes horizontais de registros sísmicos, resultando em uma atualização e refinamento das equações originalmente propostas.

Em contraste, Papadimitriou et al. (2014) adotam uma abordagem racional determinística, fundamentada em relações analíticas explícitas entre a demanda sísmica máxima, a resistência ao deslizamento e o deslocamento admissível. Nessa formulação, o coeficiente sísmico é obtido diretamente por meio de equações fechadas, sem a incorporação explícita de incertezas ou de uma modelagem probabilística do deslocamento.

As características das ondas sísmicas são modificadas ao longo de sua propagação da fonte sísmica até o local das estruturas de engenharia civil, em função das propriedades geológicas, geotécnicas e sísmicas do meio. Assim, as condições locais de sítio são usualmente caracterizadas por meio de estudos de efeito de sítio, os quais avaliam a resposta sísmica considerando fatores capazes de alterar significativamente as principais características do movimento do solo, tais como a amplitude, o conteúdo de frequências e a duração do movimento sísmico (KRAMER, 1996; ELNASHAI & SARNO, 2015).

Nesse contexto, a metodologia proposta por Papadimitriou et al. (2014) adota o Peak Ground Acceleration (PGA) em rocha como parâmetro de entrada, o qual corresponde ao limite assintótico da aceleração espectral para períodos tendendo a zero. A partir desse valor, os autores incorporam efeitos de amplificação para a determinação do coeficiente sísmico horizontal. Em contraste, as metodologias propostas por Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019) requerem o uso de parâmetros espectrais da demanda sísmica, em particular a aceleração espectral associada ao período fundamental do sistema, sendo, portanto, necessária a consideração explícita dos efeitos de sítio na definição do espectro de resposta local. Alternativamente, essas metodologias podem ser aplicadas a partir de espectros definidos em rocha, desde que sejam adotados fatores apropriados para representar os efeitos de amplificação associados às condições locais e topográficas.

Os efeitos geométricos para a definição do coeficiente sísmico, neste trabalho, estão associados às propriedades dinâmicas do material e altura da massa potencial de deslizamento. Papadimitriou et al. (2014) incopora esses efeitos por meio da espessura e velocidade de onda cisalhante da fundação e da altura, espessura e largura da massa deslizante. Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019) representam os efeitos

geométricos através da definição do período fundamental, estimado através altura máxima da massa deslizante (H) e sua velocidade de onda de cisalhamento equivalente (V_s'), Bray e Macedo (2023) recomendam as seguintes relações para estimativa do período fundamental:

$$T_s = \frac{4H}{V_s'} \quad (1)$$

$$T_s = \frac{2{,}6H}{V_s'} \quad (2)$$

Sendo a Equação 1 indicada para massas de deslizamentos longas e a Equação 2 para o caso de uma massa deslizante com geometria triangular.

Por fim, os parâmetros de desempenho são incorporados às metodologias por meio da definição do deslocamento admissível. Essa variável constitui um parâmetro de entrada estabelecido com base no julgamento de engenharia, uma vez que ainda há limitações de dados empíricos que correlacionem de forma direta deslocamentos sísmicos, níveis de dano e perda de integridade estrutural, especialmente no caso de barragens de rejeitos no contexto da mineração (JITNO & DAVIDSON, 2010). No entanto, a definição do deslocamento admissível para barragens de mineração pode ser conduzida considerando critérios de projeto e segurança, tais como a manutenção da borda livre da estrutura, as deformações admissíveis para preservação do sistema de drenagem interna, os limites de deformação toleráveis no núcleo da barragem e a avaliação da estabilidade global por meio de análises tensão deformação.

Outro parâmetro de desempenho relevante, particularmente nas metodologias propostas por Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019), é a probabilidade de excedência, definida como a medida estatística da chance de um determinado deslocamento superar o limite admissível. No contexto da engenharia sísmica, a imposição de uma menor probabilidade de excedência do deslocamento admissível implica a adoção de coeficientes pseudoestáticos mais elevados, refletindo uma exigência de maior resistência da estrutura frente à demanda sísmica e, consequentemente, um critério de projeto mais conservador.

3 ESTUDO DE CASO E ANÁLISE MULTIVARIÁVEL

O estudo de caso considerou uma seção bidimensional de uma barragem de rejeitos de minério de ferro localizada no Quadrilátero Ferrífero (MG). A estrutura corresponde a uma barragem de rejeitos com aproximadamente 100 m de altura, composta por rejeitos finos no reservatório (overflow) e rejeitos granulares utilizados na conformação do maciço (underflow). As análises pseudoestáticas foram realizadas no software Slide 2, adotando-se o critério de resistência ao cisalhamento de Mohr–Coulomb para os materiais terrosos, a curva média de enrocamento proposta por Leps (1970) para representação do comportamento resistente do enrocamento, o modelo de resistência infinita (infinite strength) para a rocha de fundação e, na região saturada dos rejeitos, o modelo Vertical Stress Ratio para definir a variação da resistência não drenada em função da profundidade. A seção analisada da estrutura é apresentada na Figura 2 e os parâmetros dos materiais apresentados na Tabela 2.

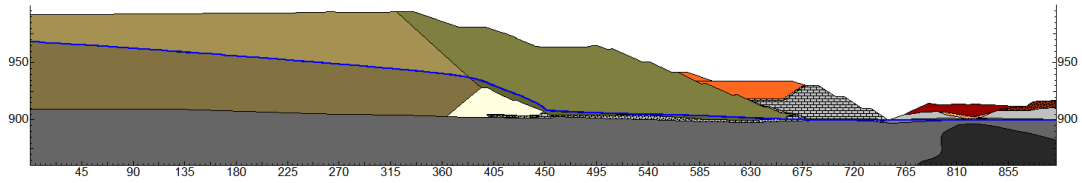


Figura 2. Modelo numérico das análises pseudoestáticas.

Tabela 2. Variáveis de entrada para estimativa do coeficiente sísmico horizontal.

Material	Cor	γ (kN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	S_u/σ'_{v0}
Rejeito Overflow		21	35	0	0,20
Rejeito Underflow		22	37	0	0,23
Reforço em Estéril		24	25	0	-
Reforço em Enrocamento		19,5		LEPS (1970)	
Dique de Partida		20	30	20	-

Material	Cor	γ (kN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	S_u/σ'_{v0}
Dreno		20	32	0	-
Aterro Bota-fora		20	22	17	-
Colúvio		16	27	5	-
Aluvião		18	21	8	-
Solo Residual Maduro de Filito		18	26	17	-
Solo Residual Jovem de Filito		19	30	3	-
Saprólito de Filito		20	33	22	-
Filito		20	Infinite Strength		

Legenda: γ: peso específico; ϕ': ângulo de atrito efetivo; c': intercepto coesivo efetivo; S_u/σ'_{v0}: razão de resistência não drenada.

A estimativa dos coeficientes sísmicos iniciou-se pela caracterização da demanda sísmica local. Para esse fim, foi utilizado o estudo de perigo sísmico desenvolvido especificamente para o local da estrutura, a partir do qual foi obtida a aceleração da resposta espectral considerando os efeitos de sítio, para um período de retorno de 10.000 anos. Com base nesse estudo, foi definido um valor de Peak Ground Acceleration (PGA) em rocha igual a 0,12 g, bem como o período fundamental da estrutura, T_e = 0,25 s. Esses resultados permitiram ainda a determinação das acelerações espectrais associadas aos períodos degradados requeridos pelas metodologias de Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019). Adicionalmente, adotou-se M_w = 7,0 como cenário sísmico de referência. Esse valor corresponde à magnitude de sismo máxima considerado no estudo de perigo sísmico probabilístico (PSHA) para a região, representando o limite superior de magnitude para o ambiente intraplaca do Quadrilátero Ferrífero. A escolha mantém consistência com o intervalo de magnitudes empregado no desenvolvimento das metodologias e permite avaliar a estabilidade sob excitação sísmica severa, sendo adequada para análises de verificação em estruturas de elevada consequência e no contexto de fechamento.

Em seguida, foram definidos os parâmetros geométricos da estrutura exigidos pelas metodologias avaliadas. A altura da massa potencial de ruptura foi estimada conforme as recomendações de Bray e Macedo (2023), sendo definida como a máxima espessura vertical da massa potencialmente deslizante, resultando em um valor aproximado de 60 m. Essa altura foi utilizada para a estimativa do período fundamental da massa deslizante por meio da Equação (1), sendo adotada de forma consistente em todas as metodologias analisadas.

As metodologias propostas por Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019) requerem a definição da aceleração espectral associada a períodos superiores ao período fundamental inicial da estrutura, especificamente $1{,}5T_s$ e $1{,}3T_s$, respectivamente. A adoção desses períodos decorre do reconhecimento de que o deslocamento permanente é governado pela demanda sísmica atuante no período degradado da massa potencialmente deslizante, isto é, em um estágio no qual a rigidez do sistema já foi reduzida em função das deformações cisalhantes induzidas pelo carregamento sísmico (Bray e Travasarou, 2007). Em Bray e Travasarou (2009), a aceleração espectral $Sa(1{,}5T_s)$ foi identificada como a medida de intensidade sísmica mais eficiente, por capturar adequadamente a redução média de rigidez associada à não linearidade dos materiais e minimizar a dispersão na correlação com os deslocamentos permanentes. Com a ampliação substancial da base de dados de registros sísmicos, Bray e Macedo (2019) reavaliaram essa escolha e demonstraram que a aceleração espectral associada a $1{,}3T_s$ apresenta menor desvio padrão e melhor representa o nível esperado de degradação do sítio, passando a ser adotada como parâmetro de demanda sísmica nas equações atualizadas. A Figura 3 apresenta a aceleração espectral para cada período fundamental degradado, sendo o período fundamental (T_s) calculado para massas de deslizamento longas (Equação 1).

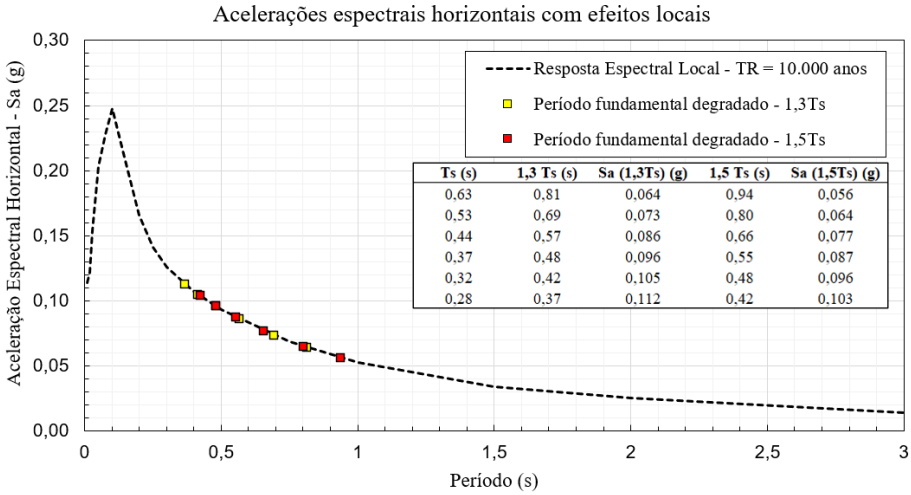
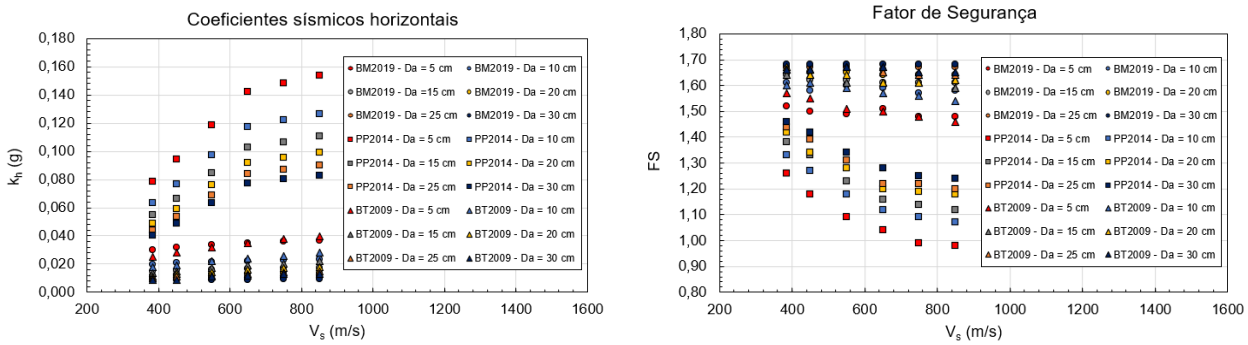


Figura 3. Estimativa da demanda sísmica local.

A metodologia proposta por Papadimitriou et al. (2014) requer, adicionalmente, a caracterização da geometria da fundação da estrutura. Neste estudo, adotou-se uma espessura de solo de fundação até a rocha (H_b) igual a 60 m, bem como uma velocidade de onda de cisalhamento do material de fundação (V_b) de 598 m/s, estimada a partir de ensaios geofísicos. Adicionalmente, foram definidos os parâmetros geométricos da massa potencialmente deslizante, sendo a altura entre os pontos de entrada e saída da superfície potencial de ruptura (z) igual a 93,71 m, a espessura da massa ao longo da superfície potencial de ruptura (t) igual a 72,29 m e a largura da massa (w) igual a 455,32 m.

A etapa final envolveu a definição dos parâmetros de desempenho da estrutura. As metodologias avaliadas requerem a definição do deslocamento admissível, parâmetro de entrada estabelecido com base no julgamento de engenharia, considerando o comportamento esperado da estrutura e o nível de dano considerado aceitável pelo responsável técnico. As metodologias propostas por Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019) exigem, adicionalmente, a definição de um parâmetro aleatório (ε) associado à probabilidade de excedência do deslocamento admissível, sendo adotados os valores de 0,66 e 0,74, respectivamente, correspondentes a uma abordagem conservadora na qual o deslocamento admissível é excedido em aproximadamente 16% dos casos. A metodologia de Papadimitriou et al. (2014), por sua vez, requer a definição do fator de deslizamento (q) para a determinação do coeficiente sísmico efetivo (k_{hE}); neste trabalho, foi adotada a formulação correspondente ao projeto conservador (q_{UB}).

Por fim, foi realizada uma análise paramétrica bivariada, considerando valores de velocidade de onda de cisalhamento (V_s) do material associado à massa potencialmente deslizante iguais a 384, 450, 550, 650, 750 e 850 m/s. O limite inferior corresponde ao valor médio da V_s registrado no rejeito Underflow, enquanto o limite superior reflete o aumento de rigidez associado à disposição de material antrópico a jusante da barragem. Foram também considerados deslocamentos admissíveis de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm. As combinações entre esses parâmetros foram avaliadas segundo as três metodologias mencionadas, resultando em 108 combinações de coeficientes sísmicos e análises pseudoestáticas. Ressalta-se que as análises pseudoestáticas consideraram os coeficientes sísmicos horizontais estimados pelas metodologias avaliadas, bem como um coeficiente sísmico de aceleração vertical igual a dois terços do coeficiente sísmico horizontal (NEWMARK & HALL, 1982). Essa abordagem permitiu avaliar a influência desses parâmetros na definição do coeficiente sísmico e, consequentemente, no fator de segurança da estrutura. A Figura 4 apresenta a variação dos coeficientes sísmicos em função da velocidade de onda de cisalhamento e dos deslocamentos admissíveis, enquanto a Figura 5 ilustra o impacto desses coeficientes no fator de segurança da estrutura para as metodologias propostas por Bray e Travasarou (2009) (BT2009), Papadimitriou et al. (2014) (PP2014) e Bray e Macedo (2019) (BM2019).



(a) Velocidade de cisalhamento. (b) fatores de segurança.

Figura 4. Variação paramétrica dos coeficientes sísmicos horizontais.

Tabela 3. Resultado comparativo pela combinação de variáveis e método.

D_a (cm)	V_s (m/s)	T_s (s)	BT2009			PP2014			BM2019		
			k_h	k_v	FS	k_h	k_v	FS	k_h	k_v	FS
5	384	0,63	0,025	0,017	1,57	0,078	0,052	1,26	0,030	0,020	1,52
	450	0,53	0,028	0,019	1,55	0,094	0,063	1,18	0,032	0,021	1,50
	550	0,44	0,032	0,021	1,51	0,119	0,079	1,09	0,034	0,022	1,49
	650	0,37	0,035	0,023	1,50	0,142	0,095	1,04	0,035	0,023	1,51
	750	0,32	0,038	0,025	1,48	0,148	0,099	0,99	0,036	0,024	1,48
	850	0,28	0,040	0,027	1,46	0,154	0,103	0,98	0,037	0,025	1,48
10	384	0,63	0,018	0,012	1,60	0,064	0,042	1,33	0,020	0,013	1,61
	450	0,53	0,019	0,013	1,61	0,077	0,051	1,27	0,021	0,014	1,58
	550	0,44	0,022	0,015	1,59	0,097	0,065	1,18	0,022	0,014	1,60
	650	0,37	0,024	0,016	1,57	0,117	0,078	1,12	0,022	0,015	1,59
	750	0,32	0,026	0,017	1,56	0,122	0,081	1,09	0,023	0,015	1,57
	850	0,28	0,028	0,019	1,54	0,126	0,084	1,07	0,023	0,016	1,58
15	384	0,63	0,014	0,009	1,64	0,055	0,037	1,38	0,015	0,010	1,64
	450	0,53	0,015	0,010	1,64	0,066	0,044	1,33	0,016	0,010	1,62
	550	0,44	0,017	0,011	1,61	0,085	0,057	1,23	0,016	0,011	1,62
	650	0,37	0,019	0,013	1,61	0,103	0,068	1,16	0,017	0,011	1,61
	750	0,32	0,020	0,013	1,61	0,107	0,071	1,14	0,017	0,011	1,61
	850	0,28	0,022	0,015	1,59	0,110	0,074	1,12	0,017	0,011	1,61
20	384	0,63	0,011	0,007	1,67	0,049	0,033	1,42	0,012	0,008	1,67
	450	0,53	0,013	0,009	1,64	0,059	0,040	1,34	0,012	0,008	1,65
	550	0,44	0,014	0,009	1,64	0,076	0,051	1,28	0,013	0,009	1,65
	650	0,37	0,016	0,011	1,61	0,092	0,061	1,20	0,013	0,009	1,64
	750	0,32	0,017	0,011	1,61	0,096	0,064	1,19	0,013	0,009	1,64
	850	0,28	0,018	0,012	1,62	0,099	0,066	1,18	0,014	0,009	1,64
25	384	0,63	0,010	0,007	1,66	0,044	0,029	1,44	0,010	0,007	1,67
	450	0,53	0,011	0,007	1,66	0,054	0,036	1,39	0,010	0,007	1,67
	550	0,44	0,012	0,008	1,67	0,069	0,046	1,31	0,011	0,007	1,67
	650	0,37	0,013	0,009	1,65	0,084	0,056	1,22	0,011	0,007	1,66
	750	0,32	0,014	0,009	1,64	0,087	0,058	1,22	0,011	0,007	1,67
	850	0,28	0,015	0,010	1,64	0,090	0,060	1,20	0,011	0,007	1,67
30	384	0,63	0,009	0,006	1,66	0,040	0,027	1,46	0,009	0,006	1,68
	450	0,53	0,009	0,006	1,66	0,049	0,033	1,42	0,009	0,006	1,68
	550	0,44	0,011	0,007	1,67	0,063	0,042	1,34	0,009	0,006	1,68
	650	0,37	0,012	0,008	1,67	0,077	0,052	1,28	0,009	0,006	1,68
	750	0,32	0,013	0,009	1,65	0,080	0,054	1,25	0,009	0,006	1,68
	850	0,28	0,013	0,009	1,65	0,083	0,055	1,24	0,009	0,006	1,68

4 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise multivariável das metodologias de definição do coeficiente sísmico permitiu avaliar o impacto da escolha metodológica e da variação das propriedades sísmicas da estrutura nos resultados das análises pseudoestáticas. Foram analisados 108 cenários, considerando diferentes valores de velocidade de onda de cisalhamento e deslocamento admissível, de modo a investigar sistematicamente seus efeitos sobre os coeficientes sísmicos e os fatores de segurança.

Os resultados indicam que o aumento da rigidez da massa potencialmente deslizante, representado por maiores velocidades de onda de cisalhamento, resulta em maiores coeficientes sísmicos requeridos. Massas mais rígidas possuem períodos fundamentais menores e maior suscetibilidade à ressonância com o movimento do solo, o que pode gerar maiores deslocamentos sísmicos para um mesmo nível de excitação (Bray e Macedo, 2019). Assim, para um mesmo limite de deslocamento admissível, massas rígidas demandam coeficientes sísmicos superiores aos de massas mais flexíveis. Ressalta-se que a faixa de velocidade de onda cisalhante analisada foi adotada de forma paramétrica para representar desde materiais mais deformáveis até materiais mais rígidos encontrados no contexto da mineração.

Observou-se que a redução do deslocamento admissível implica o aumento do coeficiente sísmico. Esse comportamento decorre da fundamentação das metodologias na teoria do bloco deslizante, na qual o deslocamento permanente ocorre apenas quando a aceleração do solo supera um valor crítico. Assim, limites mais restritivos de deslocamento exigem maiores coeficientes sísmicos.

De modo geral, as metodologias de Bray e Travasarou (2009) e Bray e Macedo (2019) apresentaram coeficientes sísmicos semelhantes, pois compartilham a mesma base probabilística, sendo a segunda uma atualização baseada em uma base de dados ampliada. Já a metodologia de Papadimitriou et al. (2014) produziu coeficientes sísmicos mais elevados e, consequentemente, fatores de segurança inferiores para todos os níveis de deslocamento analisados.

Por fim, conforme destacado por Jibson (2011), o método pseudoestático apresenta limitações para a avaliação do comportamento sísmico de grandes barragens, endo recomendada a utilização de análises dinâmicas para a avaliação do desempenho sísmico, com base na aceitabilidade do deslocamento permanente acumulado e no comportamento tensão deformação da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAY, J. D., and T. TRAVASAROU. 2007. “Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements.” J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133 (4): 381–392.

BRAY, J. D.; MACEDO, J. Simplified seismic slope stability Excel spreadsheets. 2019. Disponível em: https://www.ce.berkeley.edu/people/faculty/bray/research. Acesso em: 26 jan. 2026.

BRAY, Jonathan D.; MACEDO, Jorge. Performance-based seismic assessment of slope systems. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 168, p. 107835, 2023.

BRAY, JONATHAN, F & TRAVASAROU, THALEIA, M. (2009). “Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.” J. Geotech Geoenviron. Eng., 135. (9), 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000012.

ELNASHAI, Amr S.; DI SARNO, Luigi. Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility. 2. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

JIBSON, R. W. (2007). “Regression models for estimating coseismic landslide displacement.” Engineering Geology, v. 91, p 209-218.

JIBSON, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes — A retrospective. Engineering Geology, v. 122, p 43-50.

JITNO, H., DAVIDSON, R. (2010). “Earthquake induced displacements of earth dams and embankments.” Australian Geomechanics Journal.

KRAMER, Steven L. Geotechnical Earthquake Engineering. New York: Prentice Hall, 1996.

Newmark, N. M., Hall, W. J. (1982) Earthquake Spectra and Design, EERI Mongraph, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 103 pp.

PAPADIMITRIOU, A. G.; BOUCKOVALAS, G. D.; ANDRIANOPOULOS, K. I. (2014) Methodology for estimating seismic coefficients for performance-based design of earthdams and tall embankments. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, v. 56, p. 57–73.