

Análise de Estabilidade de Taludes a partir da Força Sísmica Induzida por Abalos Dinâmicos Naturais

Danilo José da Silva

Pós-graduando, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, danilo.jose@aluno.ufop.edu.br

Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Professor Adjunto, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, carroyo@ufop.edu.br

Daniel Silva Jaques

Professor Adjunto, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, daniel.jaques@ufop.edu.br

RESUMO: Na maioria dos casos, os estudos de estabilidade de taludes rochosos não incorporam nas suas análises as condições de carregamento dinâmico associados às atividades sísmicas naturais. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é empregar os mapas probabilísticos de risco sísmico natural para calcular os fatores de segurança, utilizando o método de equilíbrio limite, considerando tanto o estado estático quanto o pseudoestático de um talude. A metodologia adotada envolveu a obtenção dos dados de geometria do talude no local, mapeamento da orientação das estruturas geológicas, bem como a determinação das propriedades e parâmetros necessários para a análise de estabilidade. Além disso, foram levantados os mapas de risco sísmico e do passo a passo recomendado para o cálculo do coeficiente sísmico. Os resultados obtidos indicaram que o talude se encontra estável para a condição estática em relação a superfície descontínua planar. Para aplicação da força sísmica na massa de bloco sobre a superfície descontínua planar os 2% de probabilidade de excedência resultou na maior redução do fator de segurança em relação a condição estática. Com uma diminuição de 43% em comparação com as demais probabilidades. Em todas as três condições de carregamento sísmico pseudoestático, o fator de segurança permaneceu acima de um, indicando uma condição de estabilidade. Conclui-se que a força sísmica exerce influência no aumento da tensão de cisalhamento mobilizadora e na redução da tensão de cisalhamento resistiva do talude rochoso, resultando na diminuição do fator de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, sismicidade, coeficiente sísmico, análise sísmica, fator de segurança.

ABSTRACT: In the majority of instances, rock slope stability studies do not incorporate the dynamic loading conditions associated with natural seismic activity into their analysis. In this context, the objective of this study is to utilize probabilistic maps of natural seismic risk to calculate safety factors through the equilibrium method, taking into account both the static and pseudo-static state of a slope. The methodology employed involved the acquisition of slope geometry data in situ, the mapping of the orientation of the geological structures, and the determination of the properties and parameters required for the stability analysis. Furthermore, the seismic risk maps and the recommended step-by-step calculation of the seismic coefficient were collated. The results indicate that the slope is stable in the static condition in relation to the discontinuous planar surface. The probability of exceedance of 2% yielded the greatest reduction in safety factor in relation to the static condition when applying seismic force to the block mass on the discontinuous planar surface. This reduction was 43% compared to the other probabilities. In all three pseudo-static seismic loading conditions, the safety factor remained above one, indicating that the slope remained stable. It can be demonstrated that seismic forces exert a significant influence on the mobilization of shear stress and the reduction of resistive shear stress in rock slopes, ultimately leading to a decline in the safety factor.

KEYWORDS: Slope stability, seismicity, seismic coefficient, seismic analysis, safety factor.

1 INTRODUÇÃO

Os taludes são classificados como superfícies inclinadas em relação ao horizonte, compostas por massa de solo, rocha ou pela combinação de ambos. Essas estruturas são divididas em duas categorias: naturais e artificiais. Os taludes naturais formam-se sem a intervenção humana, sendo predominantemente encontrados em encostas naturais. Por outro lado, os taludes artificiais são criados pela ação do homem e incluem cortes rodoviários e ferroviários, aterros, bancadas de mineração, barragens e pilhas. Dado que muitos taludes estão sujeitos a riscos de perdas humanas, materiais e ambientais, espera-se que resistam a perturbações causadas por agentes internos e externos. Portanto, é fundamental avaliar diversos fatores de risco para determinar o fator de segurança adequado (Gerscovich, 2016; Wyllie, 2017).

O Brasil enfrenta constantes riscos de movimentos de massa em taludes, especialmente devido aos períodos intensos de chuvas que ocorrem anualmente no Sudeste do país. Esses movimentos são responsáveis por grandes perdas humanas, materiais e ambientais, motivando diversos pesquisadores a conduzirem estudos de estabilidade de taludes. Um fator frequentemente negligenciado nesses estudos é a influência das atividades sísmicas naturais que ocorrem em todo o planeta Terra. Dependendo da intensidade, essas atividades podem ser classificadas como tremores de terra (para valores mais baixos) ou terremotos (para valores mais altos). Em ambos os casos, há um alto risco de desencadeamento de movimentos de massa em taludes. As ondas sísmicas propagam-se pelo meio, atuando como uma força que reduz a resistência dos materiais, podendo levá-los ao colapso. De acordo com dados publicados pela Rede Sismográfica Brasileira (RSBR), somente no ano de 2023, foram registrados cerca de 261 abalos sísmicos em todo o território brasileiro. Desses, aproximadamente 121 ocorreram na região Nordeste, com os estados da Bahia e Ceará liderando, com cerca de 50 e 31 eventos detectados, respectivamente (Wyllie, 2017; Cimellaro & Marasco, 2018; RSBR, 2024).

Petersen *et al.* (2018) publicaram mapas probabilísticos de risco sísmico natural para toda a América do Sul. Esses mapas foram desenvolvidos com base em um extenso catálogo temporal de sismicidade, modelos de taxas de ocorrência de terremotos, avaliação do tamanho dos eventos, geometria de falhas e parâmetros relacionados ao movimento do solo. As curvas presentes nesses mapas representam a aceleração de pico máximo (PGA) e a aceleração espectral (SA) para diferentes probabilidades de excedência de eventos sísmicos naturais em 2%, 10% e 50% para um período de 50 anos. Esses mapas têm como propósito fornecer parâmetros relevantes para critérios de projeto em engenharia sísmica, especialmente na determinação do coeficiente sísmico necessário para modelar a ruptura de materiais. Sendo assim, o objetivo deste estudo é empregar esses mapas probabilísticos de risco sísmico natural para calcular os fatores de segurança, utilizando o método de equilíbrio limite, considerando tanto o estado estático quanto o pseudoestático de um talude. Essa análise será aplicada para condições prováveis de ruptura de um talude em rocha, levando em conta a probabilidade de excedência do evento sísmico.

2 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido em várias etapas. Inicialmente, realizou-se uma coleta de dados em campo, seguindo as diretrizes recomendadas por Wyllie (2017) para estabelecer a geometria do talude. Posteriormente, procedeu-se ao mapeamento estrutural em termos de altitude de orientação do talude e das principais descontinuidades, com base nas recomendações propostas por Silva (2023) para a realização de análises cinemáticas, visando obter os prováveis modos de ruptura do talude. Em seguida, a determinação da resistência da rocha foi realizada com base na metodologia proposta por Basu & Aydin (2004) e Aydin & Basu (2005). Essa metodologia avalia a dureza da rocha por meio do rebote do martelo de Schmidt, considerando correções relacionadas à orientação e ao tipo de martelo utilizado. Além disso, a densidade e a resistência à compressão uniaxial foram determinadas por meio de correlações com os valores de rebote, seguindo as metodologias sugeridas por Deere & Miller (1966) e Aydin & Basu (2005).

Os valores do GSI (Índice de Resistência Geológica), a constante do material e o fator de distúrbio, adotados para o maciço rochoso do talude, bem como os parâmetros dos critérios de Hoek-Brown Generalizado e Mohr-Coulomb, foram obtidos seguindo as metodologias sugeridas por Marinos & Hoek (2000) e Hoek *et al.* (2002). As acelerações de pico máximo (PGA) e as acelerações espectrais (SA) foram determinadas a partir das curvas relacionadas às coordenadas do talude, inseridas nos mapas probabilísticos de risco sísmico natural publicados por Petersen *et al.* (2018). Por sua vez, o cálculo do coeficiente sísmico seguiu a metodologia

apresentada por Kavazanjian *et al.* (2011). Com todos os dados obtidos para o talude estudado, realizaram-se análises de estabilidade considerando as condições estática e pseudoestática. Essas análises são essenciais para avaliar a estabilidade do talude pelo método de equilíbrio limite.

3 RESULTADOS

3.1 Localização, descrição geológica e geomecânica do talude

O talude alvo de estudo (conforme Figura 1) está localizado no município de Boa Viagem, no estado do Ceará. Trata-se de um corte de estrada situado na BR-020, uma rodovia com alto fluxo de veículos e que representa uma área de risco geológico devido às possíveis ocorrências de movimentos de massa nas rochas. O acesso a essa área se dá a partir de Fortaleza, também pela BR-020, percorrendo uma distância aproximada de 254 km. A litologia predominante no talude é o gnaisse migmatítico, caracterizado por um bandamento complexo. De acordo com a classificação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), trata-se de um ortognaisse bandado com presença de xistosidade. O talude exhibe várias famílias de descontinuidades, configurando-se como um maciço rochoso. A predominância de blocos articulados e a presença de diversas descontinuidades, como fissuras, juntas, veios, falhas, bandamentos e xistosidades, são características relevantes. A altitude de orientação do talude é de $300^{\circ}/87^{\circ}$, sendo esse um dado crucial para conduzir as análises cinemáticas e identificar possíveis modos de ruptura com base na orientação das principais descontinuidades (Forgiarini *et al.*, 2021).



Figura 1. Talude alvo do estudo.

3.2 Geometria e resultado dos cálculos das propriedades e parâmetros geotécnicos do talude

A seção do talude selecionada para análise possui uma inclinação de 87° , com um comprimento da base até a crista do talude de 6.69 m. Ao estabelecer uma relação trigonométrica entre esses dois dados para determinar a altura vertical, obtém-se um valor aproximado de 6.68 m, considerando que o talude é praticamente vertical. A medição do rebote da rocha foi realizada diretamente nas porções intactas da rocha predominante presente no talude, em uma inclinação de $+45^{\circ}$. Posteriormente, corrigiu-se a orientação e o valor do rebote N para L, considerando os 50% maiores valores dos 20 dados coletados. Isso resultou em um valor médio do índice de 49.63. Com base nesse rebote médio, determinou-se por correlação uma densidade aparente natural de 2.51 g/cm^3 , equivalente a um peso específico natural aparente de 24.6 kN/m^3 . Quanto à resistência à compressão uniaxial, que depende tanto do valor do rebote quanto da densidade, obteve-se, por meio de correlação, uma resistência de 120.42 MPa. Esses dados calculados sequencialmente estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultado do cálculo das propriedades e parâmetros geotécnicos do talude.

Propriedade/Parâmetro	Dados									
R _N (50% maiores)	61	61	60	60	59	58	54	54	54	53
R _N (+45° para 0°)	62.5	62.5	62	62	61	60	56	56	56	54
R _N para R _L	52.73	52.73	52.26	52.26	51.32	50.38	46.62	46.62	46.62	44.74
Média	49.63									
ρ (g/cm ³)	2.51									
γ (KN/m ³)	24.6									
UCS (MPa)	120.42									

3.3 Resultado dos parâmetros do critério de Hoek-Brown Generalizado e Mohr-Coulomb

Para o maciço rochoso do talude, a estrutura foi classificada como Bloco/Perturbada/Estruturada, com qualidade da superfície variando de fraca a muito fraca. O GSI foi estimado no intervalo entre 15 e 30, com um valor médio aproximado de 23. Considerando que o talude possui um tipo litológico de rocha predominante (gnaisse), foi atribuída uma única constante do material, com valor médio de 28. O fator de distúrbio do talude foi avaliado com base na condição de desmonte com explosivos aplicado em obras civis, resultando em grandes perturbações no maciço remanescente. Esse fator foi adotado como 1. Os parâmetros dos critérios de Hoek-Brown Generalizado e Mohr-Coulomb foram obtidos por meio do *software* RSDData. A inserção das propriedades e parâmetros, como resistência à compressão uniaxial, GSI, constante do material, fator de distúrbio, peso específico natural e altura do talude, permitiu gerar os resultados apresentados na Figura 2. Vale ressaltar que as constantes do critério e os parâmetros relacionados ao maciço rochoso são os mais relevantes nesse contexto.

Hoek Brown Classification		Rock Mass Parameters	
UCS of intact rock (MPa)	120.42	tensile strength (MPa)	0.003
GSI	23	uniaxial compressive strength (MPa)	0.124
m _i	28	global strength (MPa)	4.278
disturbance factor	1	modulus of deformation (MPa)	1256.878
Intact Modulus (MPa)	51540	Failure Range Envelope	
Hoek Brown Criterion		application	Slopes
m _b	0.114	sig _{3max} (MPa)	0.158
s	2.67e-06	Mohr Coulomb Fit	
a	0.536	cohesion (MPa)	0.054
		friction angle (°)	47.385

Figura 2. Resultado dos parâmetros geotécnicos calculados no *software* RSDData.

3.4 Resultado do cálculo do coeficiente sísmico

Antes de determinar o coeficiente sísmico (k) para cada evento probabilístico, é necessário obter vários parâmetros. A PGA e a SA para cada evento sísmico foram obtidas a partir dos mapas probabilísticos de risco sísmico natural para toda a América do Sul (Figura 3). Esses mapas contêm curvas de PGA e SA, permitindo a interpolação dos valores desses parâmetros com base nas coordenadas do talude. Esses dados são extraídos por meio de técnicas de geoprocessamento. Para cada um desses parâmetros, considera-se uma constante de amortecimento sísmico relacionada ao material presente no talude. No caso de uma rocha de dureza média, a constante foi atribuída como 0.80 para o F_{PGA} e o F_γ. Com esses dados, é possível calcular os parâmetros β e α, sendo que o último depende da altura do talude. A partir de todas essas informações obtidas, calculou-se o coeficiente sísmico para a probabilidade de excedência de um evento sísmico para um período de 50 anos, com probabilidades de 2%, 10% e 50%, respectivamente. A Tabela 2 apresenta todos os dados obtidos desses parâmetros, bem como os resultados dos coeficientes sísmicos para cada evento avaliado. Observa-se que a probabilidade de excedência de 50% direcionou para o menor coeficiente, uma vez que o período de retorno do evento é menor em comparação com a excedência de 2%.

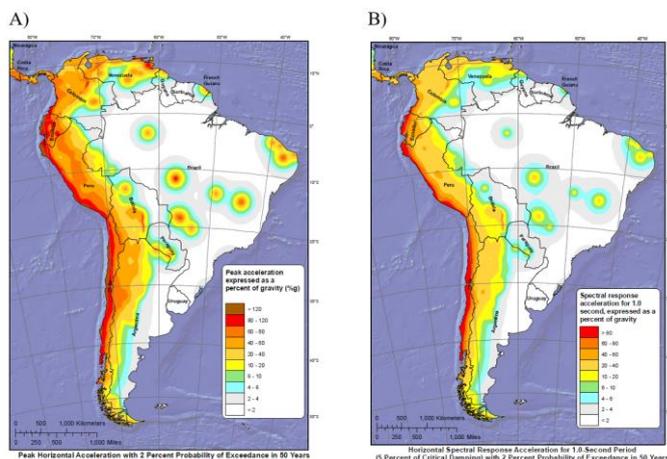


Figura 3. Mapas probabilísticos de risco sísmico natural para toda a América do Sul – A) PGA e B) SA.

Tabela 2. Resultado do cálculo dos parâmetros para obtenção do coeficiente sísmico.

Parâmetros	Dados		
	2%	10%	50%
PGA (g)	0.98	0.49	0.20
SA (g)	0.59	0.29	0.10
F_{PGA}	0.80	0.80	0.80
F_v	0.80	0.80	0.80
H (m)	6.68	6.68	6.68
β	0.60	0.59	2
α	0.85	0.84	1
k (g)	0.33	0.16	0.10

3.5 Resultado da análise cinemática

Considerando que se trata de um talude em rocha, a escala é um dos parâmetros mais relevantes para classificação. Os taludes podem ser categorizados como rocha intacta, rocha descontínua ou maciço rochoso. Embora o talude estudado não seja de grandes dimensões, ele apresenta mais de quatro famílias de descontinuidades, o que o classifica como um maciço rochoso. Independentemente dessa classificação, é recomendável conduzir análises cinemáticas para determinar os prováveis modos de ruptura, levando em consideração as orientações das descontinuidades. Essas descontinuidades desempenham um papel fundamental nas condições de falha em taludes rochosos. No escopo deste estudo, concentrou-se exclusivamente na determinação do modo de ruptura planar. Isso ocorre porque é possível aplicar análises de equilíbrio limite em duas dimensões (2D). A ruptura em cunha é mais bem abordada em análises tridimensionais (3D), enquanto a ruptura por tombamento é explorada em análises de elementos finitos. A abordagem circular só se aplica a rochas com alto grau de fraturamento, nas quais os blocos de rocha se comportam como uma massa de solo.

Para realização da análise cinemática, foram coletadas 10 medições de altitude de orientação das principais descontinuidades e famílias presentes no maciço rochoso, bem como a orientação do talude. A bússola utilizada foi calibrada para a declinação magnética da região, garantindo que os dados obtidos refletissem a orientação real. Com base no ângulo de atrito obtido para o maciço rochoso, a partir das envoltórias de correlação geradas pelo *software* RSData, conduziu-se a análise cinemática no *software* Dips. A configuração do estereograma adotado incluiu hemisfério inferior, projeção equatorial e rede estereográfica de Schmidt. A representação dos planos foi feita no formato de polos. O resultado da análise cinemática para o modo de ruptura planar apresentado na Figura 4 indica que, das dez orientações de descontinuidades e famílias, apenas uma se encontra em condição crítica para esse tipo de ruptura. Considerando um ângulo de atrito de 47° , mergulho do talude de 87° , direção de mergulho do talude de 300° e limite de direção de $\pm 20^\circ$, a descontinuidade crítica possui atitude de orientação de $293^\circ/51^\circ$ e altura vertical em relação a base do talude de 2.35 m. Esse plano é altamente visível na Figura 1, que ilustra o talude alvo do estudo.

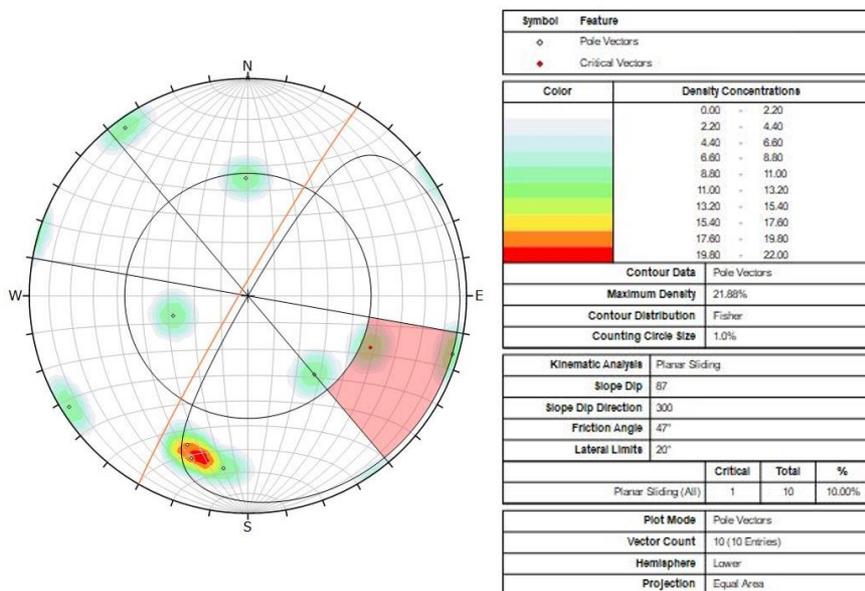


Figura 4. Resultado da análise cinemática para o modo de ruptura planar.

3.6 Resultado do fator de segurança estático e pseudoestático para probabilidades de excedência de 2%, 10% e 50% para um período de 50 anos

Com base nas propriedades e parâmetros geotécnicos, bem como nos resultados obtidos da análise cinemática, foram realizadas análises de equilíbrio limite no *software* Slide2. A modelagem da seção 2D do talude considerou sua altura e inclinação, estabelecendo assim uma representação finita artificial das extensões horizontais e verticais no domínio de influência da área do problema. O posicionamento e a orientação da descontinuidade foram adotados considerando a condição em que ela emerge na face e no topo do talude. Para o modo de ruptura, controlado pela descontinuidade na condição planar, utilizou-se o método rigoroso das fatias de Jambu corrigido, aplicado para superfícies não circulares. A busca pelo fator de segurança estático e pseudoestático foi realizada com a configuração de Block Search. Quanto à massa total da seção do talude, empregou-se os parâmetros do critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado. Para a descontinuidade, utilizou-se os parâmetros do critério de Mohr-Coulomb.

O resultado da análise de equilíbrio limite para a massa de bloco rochoso que atua sobre a superfície descontínua planar resultou em um fator de segurança mínimo estático de 2.23. Portanto, esse fator obtido indica que a massa do bloco se encontra bastante estável em termos de resistência ao cisalhamento sobre a superfície descontínua, com a intensidade da resistência sendo mais de duas vezes maior que a força peso mobilizadora sobre essa superfície potencial de ruptura. A Figura 5 apresenta o resultado dessa análise estática para a massa de bloco acima da superfície descontínua planar.

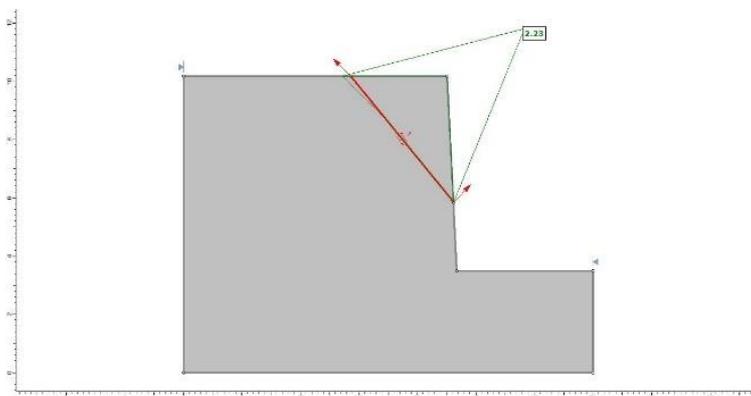


Figura 5. Resultado da análise estática para a massa de bloco rochoso acima da superfície descontínua planar.

Utilizando os mesmos dados e configurações estabelecidas para a análise que visa obter o fator de segurança estático, nessa outra avaliação, inseriu-se apenas o coeficiente sísmico como novo parâmetro para condução da análise pseudoestática. Considerando uma probabilidade de excedência de 2% para um período de 50 anos, o coeficiente sísmico obtido foi de 0.33 g. Portanto, o fator de segurança pseudoestático para a massa de bloco rochoso que atua sobre a superfície descontínua planar reduziu para 1.27, representando uma diminuição de aproximadamente 43% em relação ao fator de segurança estático. Para a probabilidade de excedência de 10% no mesmo período, o coeficiente sísmico obtido foi de 0.16 g. Nessa condição, o fator de segurança pseudoestático diminuiu para 1.72, o que representa cerca de 23% de redução em comparação com o fator de segurança estático. Por fim, para a probabilidade de excedência de 50% no período de 50 anos, o coeficiente sísmico obtido foi de 0.10 g. Nessa situação, o fator de segurança pseudoestático reduziu para 1.90, representando aproximadamente 15% de redução em relação ao fator de segurança estático. A Figura 6 apresenta os resultados das análises pseudoestáticas para a massa de bloco rochoso acima da superfície descontínua planar considerando as probabilidades de excedência de 2% (A), 10% (B) e 50% (C) para um período de 50 anos.

Apesar da aplicação de três forças sísmicas diretamente no bloco rochoso situado acima da superfície descontínua planar, o talude apresentou, nas três situações, um fator de segurança acima de 1. Isso indica uma condição de estabilidade, na qual a resistência ao cisalhamento sobre a superfície descontínua é maior do que as forças mobilizadoras induzidas pelo peso próprio e pelo carregamento dinâmico. A probabilidade de excedência de 2%, que resultou no maior coeficiente sísmico, levou a uma forte redução no valor do fator de segurança em comparação com as demais probabilidades. Isso sugere que o carregamento dinâmico diminui a resistência ao cisalhamento da rocha e aumenta as tensões de cisalhamento mobilizadoras. Portanto, pode haver risco de colapso desse talude se combinado com outros fatores instabilizantes.

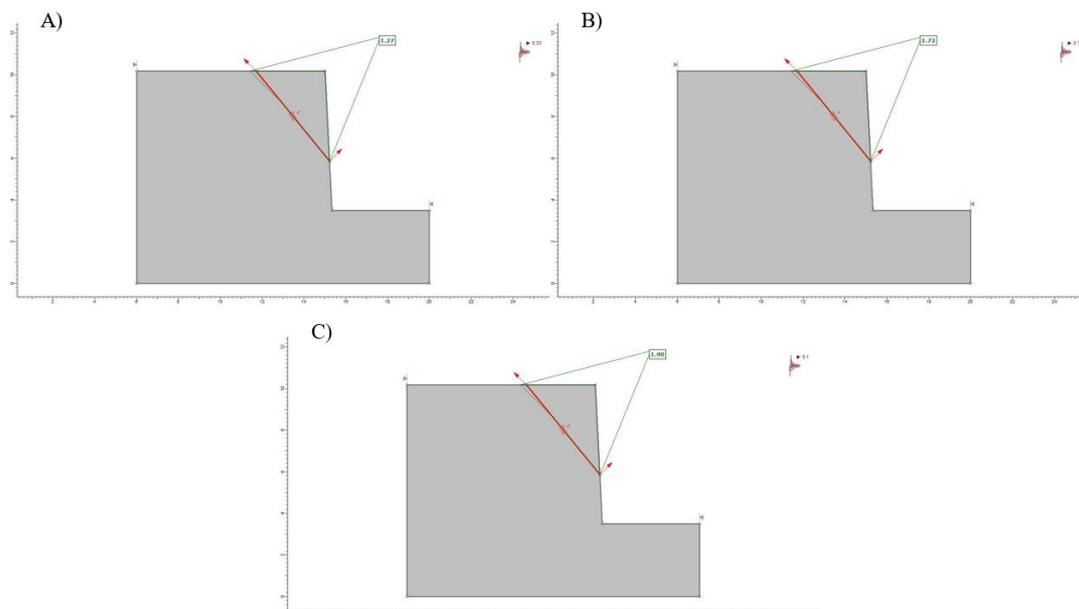


Figura 6. Resultado da análise pseudoestática para a massa de bloco rochoso acima da superfície descontínua planar considerando as probabilidades de excedência de 2% (A), 10% (B) e 50% (C) para um período de 50 anos.

4 CONCLUSÃO

Com base nas probabilidades de excedência para um evento sísmico com período de 50 anos, os 2% de probabilidade correspondeu ao maior valor de aceleração de pico máximo, aceleração espectral e coeficiente sísmico. À medida que a probabilidade de excedência aumenta para 10% e 50%, os valores de acelerações e coeficientes diminuem. A análise cinemática para o modo de ruptura planar indicou apenas uma descontinuidade principal em condição crítica, com um mergulho de 51° na face livre do talude. Essa superfície descontínua foi modelada para a realização da análise, pois influencia diretamente nas condições de

estabilidade do talude rochoso. Além disso, a análise de equilíbrio limite da massa de bloco que atua sobre a superfície descontínua planar indicou um fator de segurança estático de 2.23, representando uma condição de estabilidade estável.

Em relação às probabilidades de excedência, os 2% resultou na maior redução do fator de segurança, com uma diminuição de 43% em comparação com as demais probabilidades. Os 10% reduziu o fator em 23%, enquanto os 50% apresentou uma redução de 15%. Em todas as três condições de carregamento sísmico pseudoestático, o fator de segurança permaneceu acima de 1, indicando uma condição de estabilidade para a massa de bloco que atua sobre a superfície descontínua planar. Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a força sísmica de abalos dinâmicos naturais influencia no aumento da tensão de cisalhamento mobilizadora e na redução da tensão de cisalhamento resistiva do talude rochoso, resultando na diminuição do fator de segurança. Apesar de o talude em questão ser classificado como maciço rochoso de baixa escala, sua superfície descontínua ainda governa as condições de estabilidade. Esses resultados destacam a importância de considerar os efeitos dos carregamentos dinâmicos naturais ou induzidos tanto em projetos quanto em avaliações de taludes.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, da UFOP, pelo apoio e financiamento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aydin, A.; Basu, A. (2005) The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, v. 81, n. 1, p. 1-14.
- Basu, A.; Aydin, A. (2004) A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 41, n. 7, p. 1211-1214.
- Cimellaro, G. P.; Marasco, S. (2018) *Introduction to dynamics of structures and earthquake engineering*. 1. ed. Springer International Publishing, Italy.
- Deere, D. U. Miller. R. P. (1966) *Engineering classification and index properties for intact rock*. National Technical Information Service, Springfield.
- Forgiarini, L. L. et al. (2021) *Geologia e recursos minerais da folha Independência-SB. 24-VDI: Escala 1: 100.000: Estado do Ceará*. CPRM, Fortaleza.
- Gerscovich, D. (2016) *Estabilidade de taludes*. 2. ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Hoek, E. et al. (2002) Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, v. 1, n. 1, p. 267-273.
- Kavazanjian, E. et al. (2011) *LRFD seismic analysis and design of transportation geotechnical features and structural foundations*. National Highway Institute, Washington.
- Marinos, P.; Hoek, E. (2000) GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *ISRM International Symposium*. p. ISRM-IS-2000-035.
- Petersen, M. D. et al. (2018) Seismic hazard, risk, and design for South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 108, n. 2, p. 781-800.
- RSBR. (2024) Boletim sísmico brasileiro. *Rede Sismográfica Brasileira*. Disponível em: <http://rsbr.on.br/pevsj/index.html>. Acesso em: 13 de mar. de 2024.
- Silva, D. J. (2023) Diretrizes para a realização de análises de estabilidade de taludes utilizando os métodos de projeção estereográfica e análise cinemática e de sensibilidade. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. v. 13, n. 1, p. 37-55.
- Wyllie, D. C. (2017) *Rock slope engineering*. 5. ed. CRC Press, Boca Raton.