

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Efeito da Concavidade na Estabilidade de Taludes em Materiais Coesivo-friccionais

Ricardo José Wink de Menezes

Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, ricardo@fgs.eng.br

Anderson Fonini

Engenheiro Geotécnico, FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, fonini@fgs.eng.br

RESUMO: Apesar da vasta quantidade de relatos de campo e da literatura relacionados à confiabilidade de métodos bidimensionais de equilíbrio limite, seus resultados podem levar a abordagens muito conservadoras nos casos em que os taludes possuem geometria côncava como ocorre em muitas minas a céu aberto ou cortes em taludes rodoviários. O presente trabalho aborda, através do método de equilíbrio adaptado para a condição tridimensional, a influência da concavidade no fator de segurança de taludes homogêneos e secos com diferentes fatores geométricos e materiais com diferentes parâmetros de resistência. O procedimento adotado contou com projetos e análises fatoriais, e os resultados mostraram que é possível a estimativa do efeito da concavidade no fator de segurança mesmo quando se dispõe apenas de análises bidimensionais. Foi observado ainda que o aumento do fator de segurança com a concavidade depende principalmente da coesão e da inclinação dos taludes. Por fim, um fator que relaciona o fator de segurança de análises 2D com o 3D em taludes côncavos, e que pode ser utilizada em mapas de risco, estudos preliminares de estabilidade, inserida em algoritmos de otimização de projetos ou mesmo para se verificar se a resposta dada por uma análise tridimensional está apropriadamente refinada.

PALAVRAS-CHAVE: Taludes, Estabilidade, Fator de Segurança, Equilíbrio-Limite, Concavidade, Projeto Fatorial.

ABSTRACT: Despite of the wide literature and field reports related to the reliability of bidimensional slope stability limit equilibrium methods, its results may lead to overconservative approaches in the cases in which a concave geometry is present like in many open pit mines or highway slope cuts. The present work features, by using a tridimensional limit equilibrium method adapted from the bidimensional classic approach, the influence of concavity in the factor of safety of dry and homogeneous slopes with distinct materials' strength and geometry parameters. The adopted methodology relied on factorial design and analysis, and the results have shown that it is possible to estimate the factor of safety even when there are only bidimensional slope stability analyses available. It was observed that the increase in the factor of safety depends mainly on the cohesion and slope inclination. Afterall, a factor that relates 2D with 3D slope stability factor of safety in concave slopes was proposed, which may be used in risk mapping, preliminary stability studies, design optimization algorithms or even to verify if the factor of safety found in a 3D analysis is appropriately refined.

KEYWORDS: Slopes, Stability, Factor of Safety, Limit Equilibrium, Concavity, Factorial Design.

1 Introdução

O estudo das condições de estabilidade de taludes compostos por solo ou rocha alterada tem sido feito há décadas por meio de cálculos de equilíbrio limite bidimensionais, os quais possuem ampla aceitação no meio técnico e validação através de estudos de casos de rupturas de taludes (MARTIN et al., 2013).

Em diversos tipos de estruturas como pilhas de estéril, alguns tipos de barragens, até mesmo quando compostas por estruturas enrocadas, e taludes rochosos, e cavas de mineração de grande altura, a assunção da continuidade dos materiais é válida, o tipo de ruptura predominante para se tratar é o do tipo circular ou rotacional (CARRANZA-TORRES, 2021).

Entretanto, para casos onde a concavidade dos taludes é significativa, como em cavas a céu aberto ou cortes em rodovias, por exemplo, a abordagem bidimensional pode induzir o estudo da estabilidade a



aproximações muito conservadoras (CALA, 2007), o que em parte tem sido atribuído ao efeito de extremidade da superfície de ruptura (BALIGH & AZZOUZ, 1975). Com o avanço dos recursos computacionais, metodologias tridimensionais de cálculo da estabilidade de taludes se tornaram uma realidade, embora ainda haja pouca asserção e consenso técnico acerca de sua acurácia (READ, 2021). A respeito da geometria de escorregamentos em taludes, Sarma (1973) menciona que as superfícies de ruptura são em geral não circulares, seja em encostas naturais ou taludes, causados ou não por forças sísmicas.

Análises tridimensionais de taludes por equilíbrio-limite são adaptações das análises convencionais em duas dimensões onde as fatias são substituídas por colunas (CHEN & CHAMEAU, 1983). Uma das dificuldades envolvidas no método de equilíbrio-limite tridimensional é a relacionada a problemas de tração, que em análises bidimensionais podem ser feitas através da “thrust line” (SPENCER, 1973), mas que em problemas tridimensionais podem ser mais difíceis de se detectar e, segundo Park & Michalowski (2017), quando não contemplado, pode levar a estimativas anti-conservadoras dos fatores de segurança.

2 Metodologia

Como o grau de estabilidade de taludes depende basicamente da resistência dos geomateriais presentes, fatores geométricos, peso/cargas e poropressões, o fator de segurança pode ser entendido através dessas variáveis e da interação entre elas. Em análises bidimensionais de estabilidade por equilíbrio-limite os fatores geométricos consistem na inclinação e altura do talude, mas em análises tridimensionais a concavidade/convexidade de taludes exerce um efeito adicional sobre o fator de segurança.

Para que o efeito tridimensional da concavidade dos taludes no fator de segurança fosse determinado de maneira mais assertiva para diversos casos, buscou-se entender o efeito de diversas variáveis sobre o fator de segurança em análises bi e tridimensionais de equilíbrio-limite. Isso foi feito através de um planejamento de experimentos fatoriais. O projeto fatorial contou com análises fatoriais completas 2^k , onde são definidos valores máximos e mínimos de cada um dos fatores avaliados para análise da variável-resposta, neste caso o fator de segurança. (MONTGOMERY, 2017) As variáveis analisadas no fator de segurança em estado plano foram inclinação e altura do talude e parâmetros de resistência do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Nos cálculos tridimensionais se incluiu adicionalmente o fator raio de curvatura no pé dos taludes analisados, avaliando-se taludes de planos a côncavos. Os parâmetros geométricos avaliados são ilustrados na Figura 1. Nas análises tridimensionais, o comprimento longitudinal dos taludes extrudados foi considerado igual a no mínimo 5 vezes a sua altura, de forma que houvesse minimização dos efeitos de borda, e nas análises com taludes côncavos, o modelo foi elaborado com um semicírculo correspondente ao raio pré-definido.

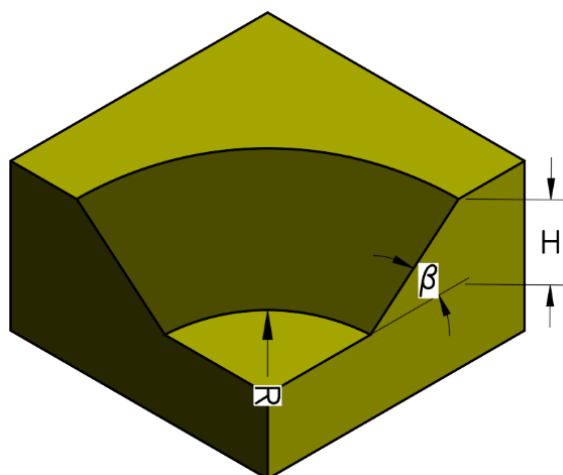


Figura 1. Parâmetros geométricos avaliados.

O peso específico dos materiais componentes dos taludes foi fixado em 20 kN/m^3 , e os taludes foram considerados secos, excluindo-se o efeito das poropressões devido a sua grande variabilidade e dificuldade de parametrização. O cálculo tridimensional de equilíbrio-limite foi baseado nas metodologias propostas por Huang et al. (2002) e Cheng et al. (2007), onde são calculados fatores de segurança em superfícies elipsoidais



compostas e sua direção de escorregamento. O método de equilíbrio-limite adotado foi o GLE/Morgenstern-Price (MORGENSTERN & PRICE, 1965) com inclinação das forças entre fatias dadas por uma função meia senóide, com rupturas não circulares, sendo a superfície de menor fator de segurança encontrada através do algoritmo iterativo de otimização meta-heurístico Cuckoo Search (CS), que se mostrou superior outros algoritmos tradicionais de otimização por necessitar menos parâmetros de refinamento (YANG & DEB, 2009), sendo indicado como melhor e mais eficiente que outros métodos para determinação da superfície crítica de ruptura em taludes (AZIZI et al., 2020).

Para se avaliar a linearidade da variável-resposta em relação aos fatores e o intervalo de seus valores avaliados, foram feitas análises preliminares, onde se variavam valores de um dos fatores e se fixava os valores dos demais a um máximo e um mínimo, analisando-se os fatores de segurança para as diferentes combinações desses fatores. Após definida uma faixa de valores onde a resposta do fator de segurança se dava linearmente, foram conduzidos projetos fatoriais onde o controle da linearidade se deu através da análise de pontos centrais correspondentes à média dos fatores. Com isso, foi possível a comparação entre os fatores de segurança bidimensionais (FS_{2D}) e tridimensionais (FS_{3D}). Os programas utilizados para a determinação dos fatores de segurança foram o Slide2 v.9 e o Slide3 v.3, ambos desenvolvidos pela Rocscience.

3 Faixa dos fatores analisados

Buscando-se a avaliação da linearidade do fator de segurança sob variações de diferentes parâmetros, sejam eles geométricos ou de resistência, foram realizadas análises preliminares bidimensionais onde foram arbitrados dois valores de cada um dos fatores avaliados, entendidos como faixas de valores possíveis para diversos materiais, sendo mostrados na Tabela 1. A partir desses valores, se avaliou curvas de fatores de segurança com a fixação de máximos e mínimos de três dos parâmetros, enquanto um dos parâmetros era variado em uma ampla faixa de valores. Os gráficos de variação do parâmetro coesão (de 0 a 600 kPa) são mostrados na Figura 2a, onde se nota que existe uma tendência linear quando a coesão se encontra entre 40 e 200 kPa. A mesma avaliação foi feita para o ângulo de atrito (Figura 2b), avaliando-se ângulos de 10 a 60° em termos de sua tangente, sendo observada uma tendência linear independentemente da faixa de ϕ . A altura foi avaliada similarmente à proposição de Hoek & Bray (1977) para a determinação do fator de segurança (FS), como o produto da altura do talude (H) pelo peso específico do material (γ), mas no presente estudo foi utilizada a escala logarítmica para uma maior linearidade da resposta. Foram escolhidas alturas entre 10 a 1.000 m, sendo que se observa um comportamento aproximadamente multilinear (Figura 2c), ou seja, retas com diferentes inclinações para diversas faixas de valores de H , indicando que a análise do fator de segurança deve se restringir a uma determinada faixa de altura. A variação do fator de segurança conforme β foi feita através do seu seno, de forma que se pudesse contar com efeito linear desse fator, conforme é mostrado na Figura 2d. Foram avaliadas inclinações de 10 a 90°, sendo observada resposta curvilínea de FS para baixas inclinações (até cerca de 30°), e também para elevadas inclinações (a partir de 65-70°), onde são esperados maiores problemas de convergência, enquanto inclinações intermediárias mostraram resposta de FS aproximadamente linear.

Tabela 1. Valores máximos e mínimos dos parâmetros avaliados.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
c (kPa)	20	250
ϕ (°)	25	40
H (m)	40	250
β (°)	30	60

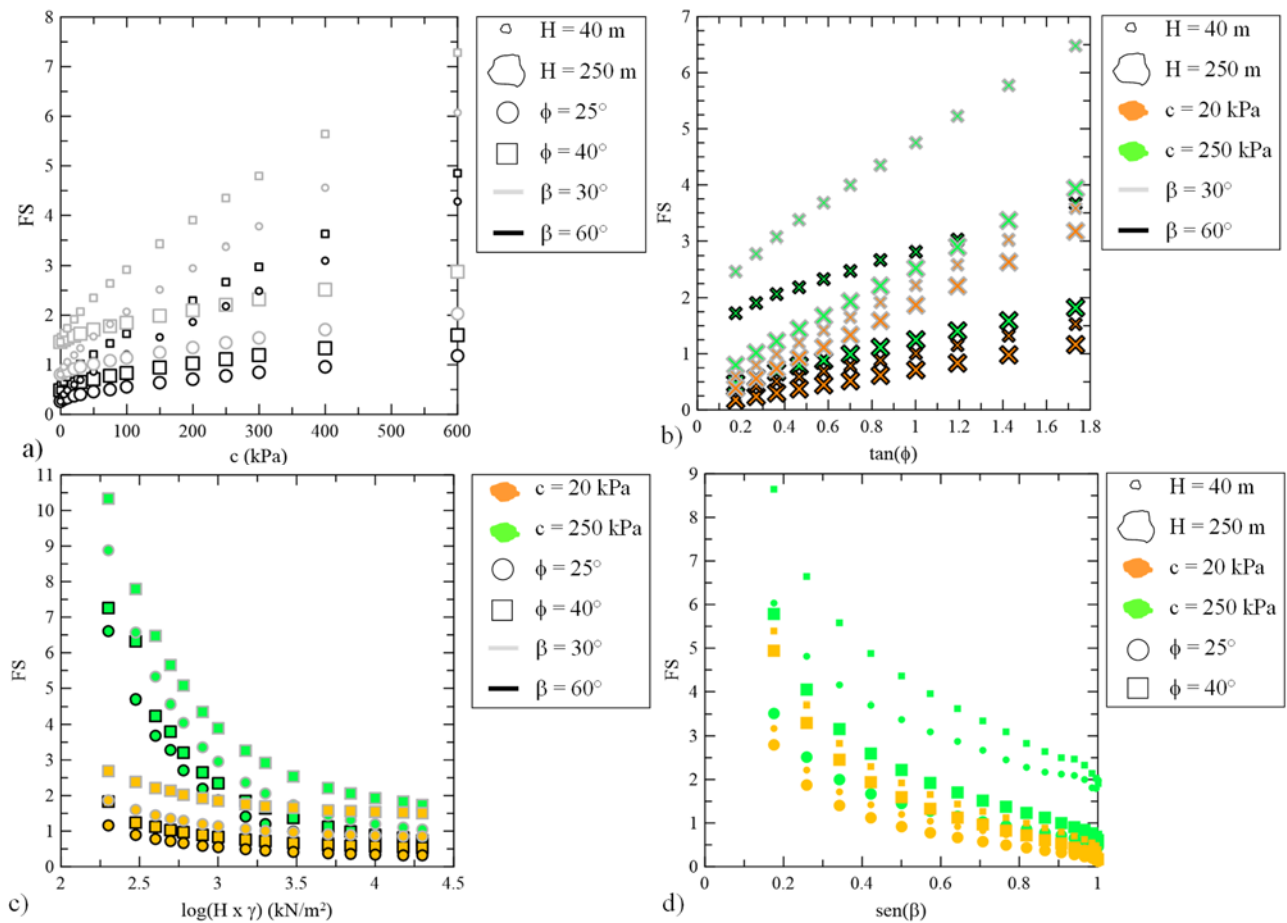


Figura 2. Avaliação da variação no fator de segurança a) com a coesão; b) com o ângulo de atrito; c) com a altura; d) com a inclinação do talude.

Posteriormente, o mesmo procedimento foi feito para análises tridimensionais, agora variando-se raios de curvatura (R) de 50 a 10.000 m e, por fim, até a condição da geometria bidimensional extrudada (raio tendendo ao infinito). Foi observado que havia uma tendência linear do fator de segurança quando analisado em termos do inverso da raiz de R , sendo o resultado mostrado na Figura 3a. Estes resultados podem ser apresentados de forma mais clara através da relação entre FS_{3D} e FS_{2D} , indicada por Ω conforme Equação (1).

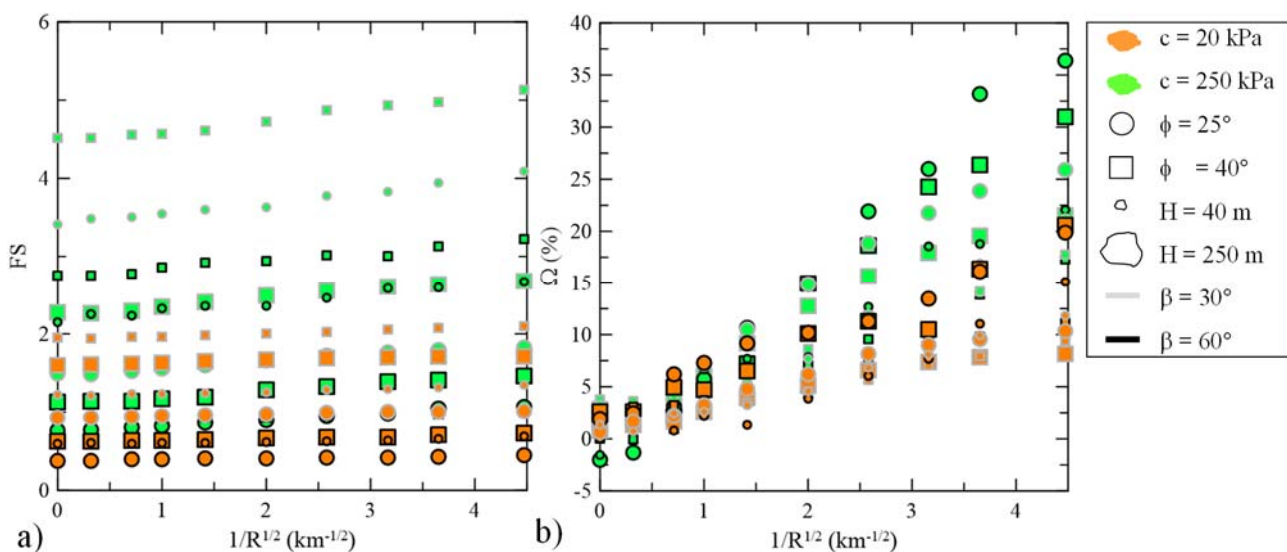


Figura 3. Resposta de a) fator de segurança; b) Ω em relação à variação de R .



Assim, os resultados de fatores de segurança em termos desta relação são mostrados na Figura 3b. Como se pode notar, existe uma maior tendência de aumento no fator de segurança em taludes de maior altura, maior inclinação, e em materiais mais coesivos.

$$\Omega = (FS_{3D}/FS_{2D}) - 1 \quad (1)$$

4 Resultados

A partir da determinação de trechos lineares dos diferentes fatores intervenientes no fator de segurança, foi adotada a faixa de parâmetros máximos e mínimos indicada na Tabela 2. Em função do efeito curvilíneo do fator de segurança em relação a variações na altura do talude, foram definidas três faixas de alturas máximas/mínimas (H_I , H_{II} e H_{III}), cuja análise foi feita individualmente para cada uma dessas faixas. De forma a se verificar a linearidade da variável-resposta nos resultados, foram avaliados também valores intermediários (pontos centrais), cujos valores dos parâmetros correspondem à média entre os máximos e mínimos. O gráfico dos efeitos principais bidimensionais, indicando valores intermediários e as médias dos máximos e mínimos, pode ser visto na Figura 4a. Os efeitos principais nas análises tridimensionais podem ser vistos na Figura 4b. Como esperado, o aumento dos valores de c , ϕ e R é benéfico à segurança, enquanto o aumento de H e β é prejudicial. Observa-se ainda que, dentro a faixa de parâmetros avaliada, o efeito da coesão se mostra significativamente superior aos demais avaliados nos taludes mais altos, enquanto o ângulo de atrito e a inclinação causam maior efeito no FS quando os taludes são mais baixos. Em análises tridimensionais, o menor efeito correspondente ao fator que retrata a concavidade do talude. Ainda se pode ver que a aproximação linear parece se justificar para os fatores de segurança avaliados, dada a proximidade do ponto central em relação às retas.

Tabela 2. Parâmetros a valores de análises fatoriais.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
c (kPa)	30	200
ϕ (°)	20	45
H_I (m)	25	50
H_{II} (m)	50	150
H_{III} (m)	150	500
β (°)	30	60
R (m)	75	∞^*

* $R = \infty$ equivale ao talude plano extrudado

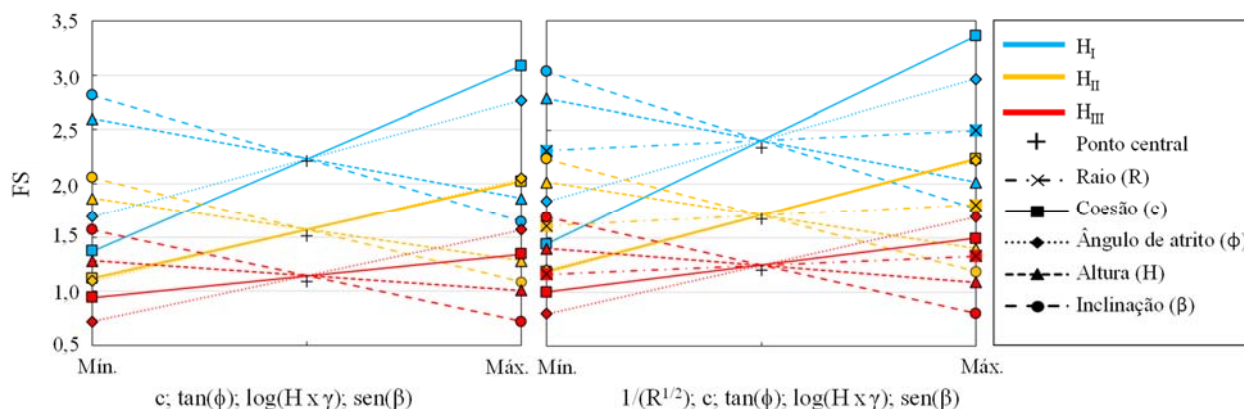


Figura 4. Efeitos principais e pontos centrais nas análises fatoriais a) bidimensionais; b) tridimensionais.



Em seguida, assumida válida a premissa de linearidade da resposta do fator de segurança em função dos fatores de análise, foram definidas equações de regressão, onde se considerou apenas a interação de até segunda ordem entre os fatores. O FS_{2D} pode ser expresso pelas equações (2) a (4), enquanto as expressões para FS_{3D} em função dos parâmetros avaliados são representadas pelas equações (5) a (7). Todas as equações apresentadas contaram com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, indicando excelente correspondência estatística entre os dados e as equações apresentadas.

$$\begin{aligned} FS_{2D,H_I} = & 3,78 + 0,06583c + 5,39 \tan(\phi) - 1,313 \log(H \times \gamma) - 5,51 \sin(\beta) \\ & + 0,002835c \tan(\phi) - 0,01818c \log(H \times \gamma) - 0,00857c \sin(\beta) \\ & - 0,582 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,466 \tan(\phi) \sin(\beta) + 1,988 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} FS_{2D,H_{II}} = & 2,103 + 0,03467c + 4,803 \tan(\phi) - 0,628 \log(H \times \gamma) - 3,18 \sin(\beta) \\ & + 0,002021c \tan(\phi) - 0,008575c \log(H \times \gamma) - 0,004339c \sin(\beta) \\ & - 0,412 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,224 \tan(\phi) \sin(\beta) + 0,993 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} FS_{2D,H_{III}} = & 0,811 + 0,01577c + 4,29 \tan(\phi) - 0,203 \log(H \times \gamma) - 1,379 \sin(\beta) \\ & + 0,00114c \tan(\phi) - 0,003513c \log(H \times \gamma) - 0,001555c \sin(\beta) \\ & - 0,2503 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,148 \tan(\phi) \sin(\beta) + 0,37 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} FS_{3D,H_I} = & 4,27 + 0,069 \left(1/\sqrt{R}\right) + 0,06992c + 4,969 \tan(\phi) - 1,517 \log(H \times \gamma) \\ & - 5,43 \sin(\beta) + 0,000308 \left(1/\sqrt{R}\right)c + 0,0282 \left(1/\sqrt{R}\right) \tan(\phi) + 0,0407 \left(1/\sqrt{R}\right) \log(H \times \gamma) \\ & - 0,0735 \left(1/\sqrt{R}\right) \sin(\beta) + 0,003087c \tan(\phi) - 0,019199c \log(H \times \gamma) - 0,009659c \sin(\beta) \\ & - 0,388 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,667 \tan(\phi) \sin(\beta) + 2,01 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} FS_{3D,H_{II}} = & 2,323 + 0,0845 \left(1/\sqrt{R}\right) + 0,03787c + 5,002 \tan(\phi) - 0,702 \log(H \times \gamma) \\ & - 3,824 \sin(\beta) + 0,000305 \left(1/\sqrt{R}\right)c + 0,0266 \left(1/\sqrt{R}\right) \tan(\phi) - 0,0163 \left(1/\sqrt{R}\right) \log(H \times \gamma) \\ & - 0,0455 \left(1/\sqrt{R}\right) \sin(\beta) + 0,002487c \tan(\phi) - 0,009313c \log(H \times \gamma) - 0,005542c \sin(\beta) \\ & - 0,468 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,26 \tan(\phi) \sin(\beta) + 1,207 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} FS_{3D,H_{III}} = & 1,072 + 0,0864 \left(1/\sqrt{R}\right) + 0,017774c + 4,383 \tan(\phi) - 0,2774 \log(H \times \gamma) \\ & - 1,925 \sin(\beta) + 0,000243 \left(1/\sqrt{R}\right)c + 0,0267 \left(1/\sqrt{R}\right) \tan(\phi) - 0,0173 \left(1/\sqrt{R}\right) \log(H \times \gamma) \\ & - 0,0327 \left(1/\sqrt{R}\right) \sin(\beta) + 0,001464c \tan(\phi) - 0,003929c \log(H \times \gamma) - 0,002346c \sin(\beta) \\ & - 0,2781 \tan(\phi) \log(H \times \gamma) - 3,1454 \tan(\phi) \sin(\beta) + 0,526 \log(H \times \gamma) \sin(\beta) \end{aligned} \quad (7)$$



Onde: c é a coesão do material (kPa); ϕ é o ângulo de atrito interno do material; γ é o peso específico do material (kN/m^3); H é a altura do talude (m); β é o ângulo de inclinação do talude; R é o raio de concavidade da base do talude (km).

Com essas equações, torna-se possível a obtenção do valor de Ω , no qual, como se espera a ocorrência que os erros decorrentes da aproximação de curvas por equações lineares seja minimizada. Para ilustrar a distribuição dos valores de Ω obtidos a partir dessas equações, foram gerados 500 conjuntos de variáveis randômicas (inseridas dentro das faixas de parâmetros avaliados), onde os resultados são mostrados na Figura 5. Observa-se que o valor de Ω cresce quando a altura dos taludes aumenta, porém, quando o raio de curvatura atinge valores da ordem de 10.000 m, o valor de Ω estabiliza, ou seja, não há praticamente influência do raio de curvatura no fator de segurança a partir desse valor.

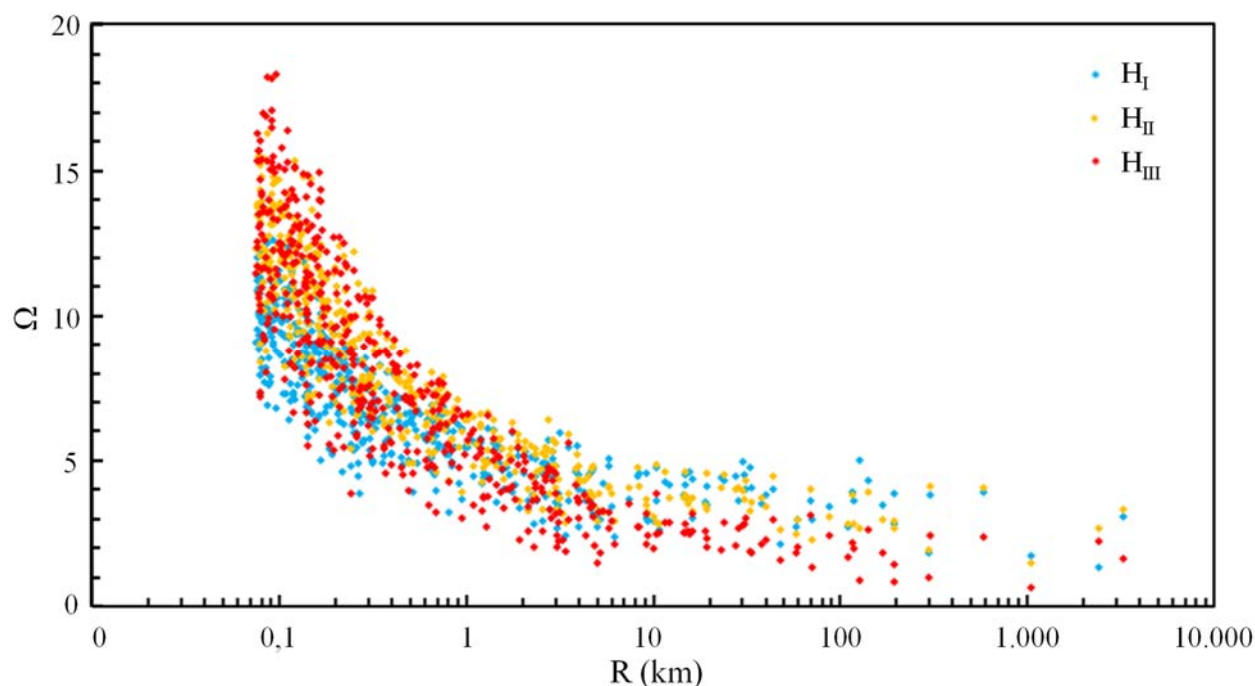


Figura 5. Distribuição de Ω para 500 combinações de fatores aleatórios em cada faixa de H .

5 Conclusões e observações

Pode-se concluir deste trabalho que existe uma grande dependência do fator de segurança em relação às variáveis avaliadas para solos coesivo-friccionais, sendo possível com as equações propostas, a estimativa da relação entre o grau de estabilidade de análises 2D e 3D conforme o raio de concavidade da base do talude. Foi observado que existe uma dependência do efeito de borda em rupturas tridimensionais, embora esse efeito confira menor aumento no fator de segurança que alguns resultados reportados na literatura. A relação proposta entre fatores de segurança bi e tridimensionais deve ser tomada apenas como referência, já que seu valor foi obtido por ajuste estatístico, e pode ocasionar erros se utilizado equivocadamente, sendo que a regressão se propõe a avaliar apenas os casos onde os parâmetros estão dentro dos limites analisados, não sendo recomendadas extrapolações. Dos resultados se notou que em materiais mais coesivos e em taludes inclinados, o efeito do raio de curvatura tende a ser mais significativo na resposta do fator de segurança. Somado a isso, são sugeridas também avaliações tridimensionais em taludes sob ação de pressões de água, efeitos sísmicos e anisotropia. Apesar da tendência de comportamento identificada, análises tridimensionais de equilíbrio limite ainda exigem validações, seja através de observações de rupturas reais, de análises de elementos finitos, diferenças finitas, ou outras metodologias.

AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem a FGS Geotecnia pelo suporte em pesquisa e disponibilização de sua estrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baligh, M. M., Azzouz, A. S. End Effects on Stability of Cohesive Slopes. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 101(11) 1105-1117.
- Cala, M. (2007). Convex and Concave Slope Stability Analyses with Numerical Methods. *Archives of Mining Sciences* 52, Issue 1 75-89.
- Carranza-Torres, C. (2021) Computational tools for the analysis of circular failure of rock slopes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 833.
- Chen, R. H.; Chameau, J. L. (1983). Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes. *Géotechnique* 33, 1 31-40.
- Cheng, Y. M., Yip, C. J. (2007) Three-Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern-Price's Techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133: 1544-1555.
- Hoek, E., Bray, J. W. (1977) *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London. Revised Second Edition.
- Huang, C.-C., Tsai, C.-C., Chen, Y.-H. (2002) Generalized Method for Three-Dimensional Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128:836-848.
- Martin, D., Lorig, L., Stacey, P. Slope design considerations in: Martin, D., Stacey, P. (2013) *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia. CRC Press.
- Montgomery, Douglas C (2017). *Design and Analysis of Experiments* 9th ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965) The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, 15, 79-93.
- Park, D., Michalowski, R. L. (2017) Three-dimensional stability analysis of slopes in hard soil/soft rock with tensile strength cut-off. *Engineering Geology*, 229: 73-84.
- Read, J. R. L. Three-dimensional limit equilibrium slope stability analyses, method, and design acceptance criteria uncertainties (2021). *Second International Slope Stability in Mining Conference (SSIM)*.
- Sarma, S. K. (2018) Stability analysis of embankments and slopes. *Géotechnique* 23, No. 3, 423-433.
- Spencer, E. (1973). Thrust line criterion in embankment stability analysis. *Geotechnique*, 23, No. 1, 85-100.
- Yang, X.-S., Deb, S. Cuckoo Search via Lévy Flights. *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing* (NaBIC 2009)