

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/169

Análise probabilística da estabilidade de um talude rodoviário da BR 470

André Luis Meier

Doutorando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, de.luis.meier@gmail.com

Tamires dos Santos

Graduando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, tamires.frutuoso@gmail.com

Artur Machado Scheidt

Graduando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, arturmachadoscheidt@gmail.com

Gracieli Dienstmann

Doutora em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, g.dienstmann@ufsc.br

Natália Ziesmann

Mestra em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, nziesmann@gmail.com

RESUMO: O estudo da estabilidade dos taludes é de extrema importância para a sociedade, pois através dele é possível analisar a segurança de encostas e definir critérios de alerta contra danos financeiros e, no pior dos cenários, contra perdas de vidas humanas. Para estabelecer de forma mais rigorosa um critério de alerta é necessário quantificar, além do fator de segurança da encosta, a sua probabilidade de falha. Neste contexto são necessários métodos probabilísticos, sendo as simulações baseadas no Método de Monte Carlo (MMC) as mais utilizadas em abordagens com fins geotécnicos. Uma aplicação de MMC para estabilidade de taludes consiste em realizar simulações do perfil de interesse variando a cada interação parâmetros-chaves do material (ângulo de atrito, coesão, peso específico, entre outros). A resposta do problema será uma distribuição do fator de segurança, que pode ser utilizada para análise do fator de segurança médio e probabilidade de falha. A probabilidade de falha é obtida através do número de simulações com fator de segurança abaixo da unidade. As aplicações mais comuns encontradas na literatura costumam trabalhar com perfis homogêneos a cada rodada, não quantificando a distribuição espacial dos parâmetros. Neste sentido, no presente trabalho é apresentado um estudo de caso onde a probabilidade de falha será quantificada com base no MMC, porém introduzindo a cada rodada, campos aleatórios. Para a realização da análise da variabilidade foi utilizado o Software PLAXIS, que realiza análises com base nos métodos clássicos de equilíbrio limite e também tem implementado o método LAS (Subdivisão Média Local, em inglês). Desta forma, torna-se possível realizar um comparativo de probabilidades encontradas pelos diferentes métodos de equilíbrio limite. Como estudo de caso será utilizada uma seção de referência um aterro rodoviário localizado no km 30+220 da obra de duplicação da BR 470, situado entre Navegantes/SC e Indaial/SC. A seção foi estudada por Ziesmann (2023) e Cordeiro (2019), que utilizaram o Software ABAQUS. Será realizada também, um comparativo entre os resultados encontrados nos diferentes softwares.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Variabilidade, Método de Monte Carlo, Campos Aleatórios, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT: The study of slope stability is of utmost importance to society, as it allows for the analysis of the safety of slopes and the definition of warning criteria against financial losses and, in the worst-case scenarios, loss of human lives. To establish a more rigorous warning criterion, it is necessary to quantify, in addition to the slope's safety factor, its probability of failure. In this context, probabilistic methods are necessary, among which simulations based on the Monte Carlo Method (MCM) are commonly used in geotechnical approaches. An application of MCM for slope stability involves simulating the profile of interest, varying key material parameters (friction angle, cohesion, specific weight, among others) at each iteration.

The problem's response will be a distribution of the safety factor, which can be used for analyzing the average safety factor and probability of failure. The probability of failure is obtained through the number of simulations with a safety factor below unity. The most common applications found in the literature typically work with homogeneous profiles in each round, not quantifying the spatial distribution of parameters. In this sense, the present study presents a case study where the probability of failure will be quantified based on MCM, but introducing random fields at each round. For the variability analysis, the PLAXIS Software was used, which performs analyses based on classical limit equilibrium methods and also implements the LAS (local average subdivision) method. Thus, it becomes possible to make a comparison of probabilities found by different limit equilibrium methods. As a case study, a reference section will be used, a highway embankment located at km 30+220 of the BR 470 duplication project, situated between Navegantes/SC and Indaial/SC. The section was studied by Ziesmann (2023) and Cordeiro (2019), who used the ABAQUS Software. A comparison will also be made between the results found in the different software's.

KEYWORDS: Variability Analysis, Monte Carlo Method, Random Fields, Slope Stability.

1 INTRODUÇÃO

A variação espacial das propriedades geotécnicas devido à composição mineralógica é amplamente reconhecida. Este fato traz aos engenheiros grandes desafios na obtenção de dados a respeito do solo. Além da questão da dificuldade de se conseguir realizar ensaios que tragam a variabilidade do solo, existe também a questão econômica, que é um fator determinante em obras de engenharia. A abordagem tradicional para trabalhar com essa incerteza no projeto geotécnico é realizada utilizando valores característicos das propriedades do solo juntamente com um generoso fator de segurança (Fenton; Griffiths, 2008). Houve um aumento nos estudos referentes a métodos que consigam determinar essas incertezas e capturar a variabilidade espacial dos parâmetros do solo e utilizá-las com campos aleatórios. Existem várias abordagens para criar esses campos, empregando características estatísticas como parâmetros de entrada. Ao utilizar esses campos, a incerteza das propriedades que variam no espaço pode ser incorporada em um programa que utiliza métodos de cálculo, como de equilíbrio limite, e são realizadas uma série de simulações de Monte Carlo para calcular a probabilidade de falha. Como resultado, ao considerar essa variação espacial, o modelo em estudo pode demonstrar um comportamento do material e mecanismos de falha mais fiéis à realidade.

Os campos aleatórios podem ser gerados através do método LAS (Subdivisão Média Local, em inglês), inicialmente proposto por Fenton e Vanmarcke (1990) e detalhadamente explicado por Fenton e Griffiths (2008), que justificam que a maioria das propriedades de engenharia são médias locais. No enfoque LAS, manter a consistência interna significa preservar a média local em todas as subdivisões. Em cada estágio, as células são divididas ao meio, e cada uma recebe um valor aleatório, de modo que as médias locais sejam representativas da média global. Esse processo garante que a média global permaneça constante ao final.

Para se obter informações sobre o solo estudado, e dessa forma analisar a estabilidade de taludes e a variabilidade do material, é necessário realizar investigação geotécnica. Para isso, realiza-se o Piezocone Penetration Test (CPTu), que conforme Schnaid e Odebrecht (2012), é reconhecido como uma das ferramentas mais cruciais internacionalmente para prospecção geotécnica. Este ensaio proporciona a estratigrafia do perfil do solo, identifica as propriedades dos materiais e prevê a capacidade de carga das fundações. Durante o teste, o piezocone é inserido no solo a uma velocidade padrão de 20mm/s, medindo a resistência de ponta (q_c) durante a penetração. Além disso, ele registra a resistência de atrito lateral (f_s) e as poropressões (u) ao longo da profundidade do teste, permitindo a obtenção da resistência real mobilizada (q_1). Com base nos parâmetros obtidos diretamente por meio do ensaio, é possível estimar outros mediante correlações, como a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), que é determinada através da razão entre a resistência e o fator de capacidade do cone (N_{kt}), obtido por meio de uma comparação do valor de S_u do ensaio de palheta realizado na mesma profundidade (Schnaid; Odebrecht, 2012).

De posse dos parâmetros são obtidas médias, desvios-padrão e escala de flutuação para descrever a variabilidade em um conjunto de dados de propriedades do solo. A escala de flutuação descreve a distância na qual os parâmetros de um solo ou rocha são semelhantes ou correlacionados e pode ser estimada através do Método Exedito de Vanmarcke (MEV), Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e Adequação do Modelo de Autocorrelação (AMA).

2 METODOLOGIA

2.1 Local de estudo

O aterro utilizado está situado no trecho de duplicação da BR-470, em Santa Catarina, que compreende a ligação entre as cidades de Gaspar e Navegantes. A região está em processo de duplicação de aproximadamente 73km, devido ao alto tráfego de veículos de carga e de passeio. No km 30+220 está situada a área de pesquisa, que, de acordo com Cordeiro (2019), é uma região com depósito de argila mole, compostos por camadas de turfa, argila cinza com ou sem matéria orgânica, intercaladas por lentes de areia. Segundo Cordeiro (2019) foram realizados ensaios de campo e de laboratório no formato de ilhas de investigação, contemplando sondagens SPT (do inglês, *Standard Penetration Test*), determinação da umidade natural de camadas moles, CPTu, ensaio de dissipação, de palheta, ensaio de adensamento e triaxiais não drenados e não consolidados UU (do inglês, *Unconsolidated and Undrained*). O modelo em questão refere-se a uma seção transversal da Rodovia BR-470, localizada no estado de Santa Catarina. Esta seção é composta por dois aterros rodoviários: um antigo, construído nas décadas de 1970 e 1980, e um novo, parte do projeto de duplicação. Além dos aterros, há uma berma de equilíbrio, todos apoiados sobre um solo homogêneo e mole, caracterizado por Cordeiro (2019) como uma argila cinza-escuro muito mole. A Figura 1 apresenta uma ilustração da seção transversal em questão. O objetivo principal é verificar a estabilidade dos aterros sobre o solo mole, levando em consideração um carregamento rápido devido à construção do aterro de duplicação, e, conseqüentemente, em condição não drenada.

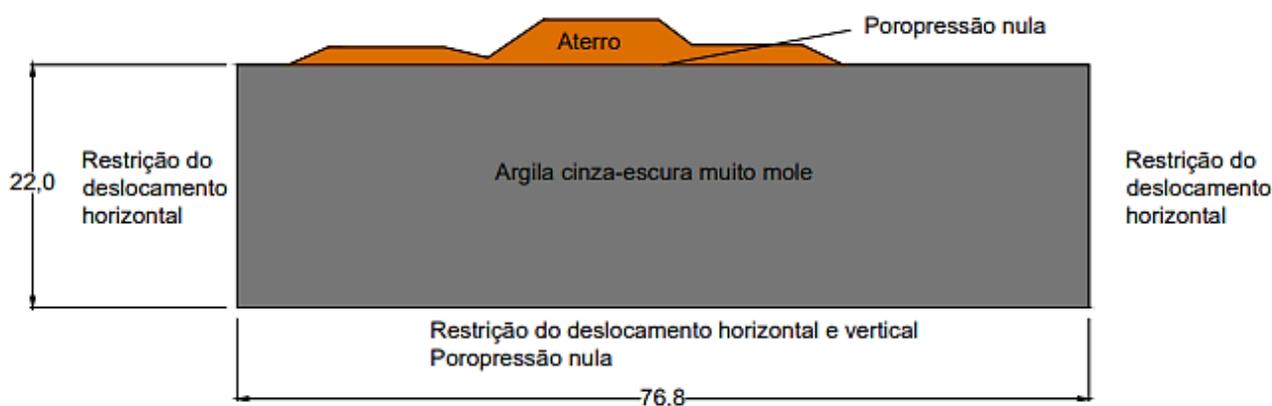


Figura 1. Dimensões em metros do modelo e condições de contorno (Ziesmann, 2023).

2.1.1 Análise Estatística

A escala de flutuação é um dado de entrada importante para a geração de campos aleatórios. Na presente pesquisa, a escala de flutuação vertical foi calculada por meio de três metodologias: Método Expedito de Vanmarcke (MEV), Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e Ajuste do Modelo de Autocorrelação (AMA). Para obtenção da escala de flutuação buscou-se zerar a média do resíduo da tendência utilizando uma equação linear, ajustando-a até que graficamente também fosse possível constatar a tendência. Dessa forma, os valores de escala de flutuação obtidos foram iguais a 0,33m para q_c , 0,34m para q_t , 0,62m para f_s e 0,34m para S_u . A Tabela 1 reúne os valores encontrados para a escala de flutuação para cada método e propriedade do solo, considerando tanto os parâmetros sem a remoção da tendência dos dados quanto seus valores residuais.

Em síntese, os resultados da Tabela 1 destacam que os diferentes métodos caracterizaram escalas de flutuação com magnitudes distintas, havendo, em geral, uma boa concordância nas escalas calculadas para os parâmetros q_c , q_t e S_u . O método MEV apresentou as menores escalas de flutuação, em torno de 0,34m para q_c , q_t e S_u , enquanto para f_s foi de 0,62m. Considerando os valores sem a remoção da tendência, o método IAA revelou uma amplitude maior para as escalas de flutuação, com valores aproximados de 3,29m e 4,24m para q_c e q_t , respectivamente, e 2,32m para S_u , enquanto para f_s foi de 1,38m. Comparativamente, os

resultados para os valores residuais foram menores (exceto para f_s), aproximando-se mais dos resultados obtidos pelo MEV. Por sua vez, pelo método AMA, as escalas de flutuação foram geralmente próximas quando consideradas as leituras de q_c , q_t e S_u , em torno de 1,25m, 1,35m e 1,10m, respectivamente. O parâmetro f_s também apresentou discrepâncias maiores por este método. Em comparação com os valores residuais, as escalas de flutuação reduziram (exceto novamente para f_s), aproximando-se dos valores do MEV. Essa redução resultou em uma menor discrepância entre os valores calculados pelo MEV e IAA/AMA.

Tabela 1. Escala de flutuação obtida por três métodos para os parâmetros do solo.

Parâmetro	Sem remoção da tendência			Residual	
	MEV	IAA	AMA	IAA	AMA
q_c	0,33	3,29	1,25	0,77	0,90
q_t	0,34	4,24	1,35	1,50	0,90
f_s	0,62	1,38	0,90	1,65	1,50
S_u	0,34	2,32	1,10	0,87	0,90

Assim, um campo foi criado para representar a resistência não drenada da camada de argila. Os parâmetros estatísticos necessários para a geração desse campo, incluindo a função de densidade de probabilidade (FDP), foram obtidos a partir dos dados do perfil de S_u sem a remoção da tendência. Esses dados foram derivados de medidas de ensaio de piezocone e N_{kt} , derivados de uma medida pontual de S_u de ensaios de palheta. A partir desses dados foi encontrada a média de 25,97 kPa e o desvio padrão de 1,87 kPa.

Quanto à escala de flutuação vertical, que foi determinada por três métodos diferentes, foi considerado o valor mínimo obtido para a resistência não drenada, ou seja, 0,34m. Por sua vez, a escala de flutuação horizontal utilizada para gerar o campo aleatório foi de 10,0m, comumente adotado na literatura.

Em relação aos dois materiais mencionados, a Tabela 2 apresenta os valores associados às propriedades do aterro compactado e berma e da fundação em argila-cinza escura muito mole. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi empregado para analisar tanto o aterro quanto a fundação. Os dados fornecidos na Tabela 2 foram extraídos do trabalho de Cordeiro (2019) e utilizados durante a modelagem numérica realizada.

Tabela 2. Valores atribuídos aos parâmetros utilizados na modelagem numérica.

Material	Parâmetros	Valor
Aterro compactado e berma	Peso específico	20 kN/m ³
	Ângulo de atrito	35°
	Coesão	5 kPa
Argila cinza-escura muito mole	Peso específico	16 kN/m ³
	Ângulo de atrito	0°
	Resistência não drenada	Campo aleatório

No software PLAXIS a modelagem foi realizada utilizando uma malha no campo aleatório de 128 divisões na horizontal e 32 na vertical. Além disso, foram analisados os resultados utilizando o campo aleatório com superfície de ruptura fixa e flutuante, cuja variação está na consideração da mesma superfície de ruptura crítica para todas as análises do primeiro caso, enquanto que no segundo caso estas são variáveis. Também, utilizou-se do método de auto-refinamento para a obtenção da superfície de ruptura, e para o cálculo do equilíbrio limite foram feitas simulações usando os métodos Fellenius, Bishop simplificado, Jambu simplificado, Spencer e Morgenstern-Price (M-P).

3 RESULTADOS

Após as simulações foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3, na qual constam os valores de fator de segurança médio, desvio padrão e covariância de cada método de cálculo, tanto para a superfície de ruptura fixa quanto a flutuante. O método de Jambu simplificado foi o mais conservador, com FS médio de 1,774, enquanto que para todos os outros 4 métodos os valores foram superiores a 1,9.

Tabela 3. Resultados dos fatores de segurança das simulações.

	Fellenius		Bishop Simplificado		Jambu simplificado		Spencer		M-P	
	Fixa	Flut.	Fixa	Flut.	Fixa	Flut.	Fixa	Flut.	Fixa	Flut.
Média	1,939	1,939	1,998	1,994	1,774	1,774	1,994	1,991	1,997	1,994
Desvio padrão	0,017	0,017	0,018	0,016	0,015	0,015	0,018	0,016	0,018	0,016
Covariância	0,009	0,009	0,009	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008

Segundo Ziesmann (2023), a simulação realizada no ABAQUS resultou em um fator de segurança médio de 2,275, superior a todos os valores encontrados com a modelagem realizada no PLAXIS, utilizando os mesmos parâmetros, características e valores que a autora. Ademais, após 5000 simulações realizadas, a autora obteve uma probabilidade de falha de 0,54%. Porém, em nenhuma das simulações utilizando o PLAXIS foi obtido uma probabilidade de ruptura diferente de 0%.

Nas modelagens realizadas no presente estudo também foram obtidos histogramas de fator de segurança para cada método, onde pode ser observado uma distribuição normal dos valores. A Figura 2 apresenta um comparativo entre os resultados das análises através do método de Morgenstern-Price para as superfícies de ruptura fixas e flutuantes, que geraram curvas muito semelhantes.

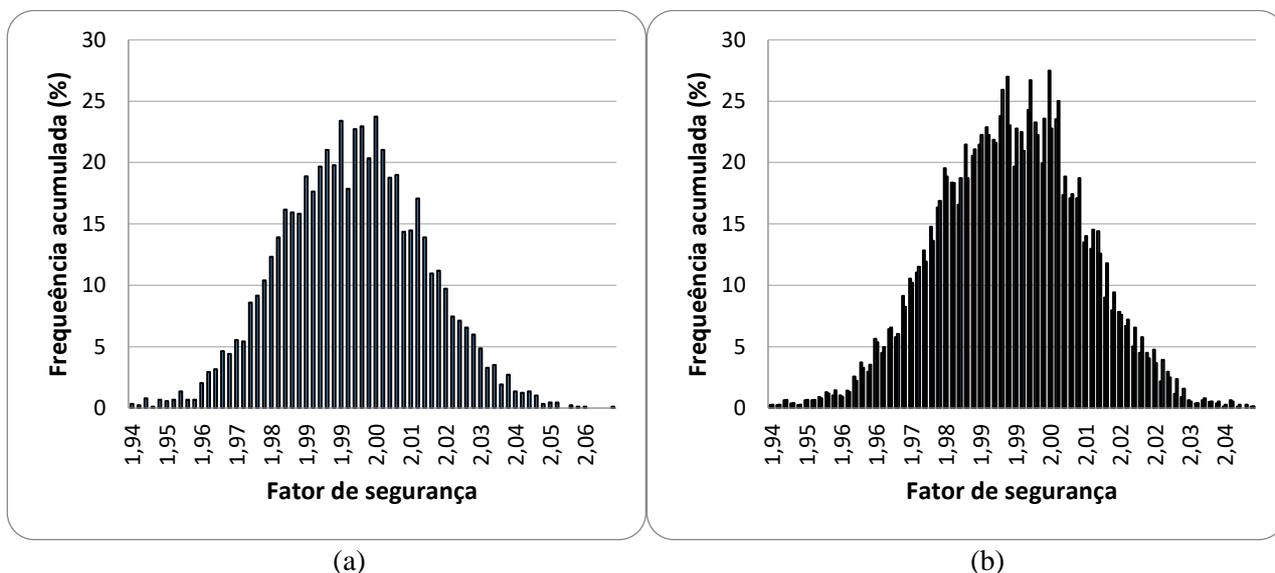


Figura 2. Distribuição do fator de segurança para a superfície de ruptura fixa (a) e flutuante (b).

Foram calculados também diferentes cenários de valores da escala de flutuação vertical e horizontal e de desvio padrão mais críticos, encontrados na literatura, apenas para o método de Morgenstern-Price. Na Tabela 4 constam os valores calculados nessa pesquisa utilizando o software PLAXIS com a superfície de ruptura (SR) fixa e flutuante, enquanto que na Tabela 5 os obtidos no software ABAQUS.

Para os resultados da presente pesquisa (Tabela 4), numa comparação entre os cenários 0 e 1 nota-se que o aumento na escala de flutuação vertical influenciou pouco no FS, enquanto que observando os cenários 2, 3 e 4, nos quais houve aumento gradativo no valor do desvio padrão, percebe-se uma diminuição significativa da média de FS. Entre os cenários 0 e 6 e 1 e 5, nos quais ocorreu um aumento na escala de flutuação horizontal, foi gerada praticamente nenhuma interferência no valor de FS. Na comparação entre a superfície de ruptura fixa e flutuante, é possível notar que os valores de FS são maiores para o primeiro caso em todos os cenários, contudo, ambas não apresentaram nenhuma probabilidade de falha.

Ao analisar os valores obtidos utilizando o software PLAXIS, que trabalha com o método de equilíbrio limite, com o método de elementos finitos (ABAQUS), percebe-se que em todos os cenários a média dos fatores de segurança foram inferiores para a presente pesquisa. Todavia, através do método de elementos finitos todos os cenários ocasionaram uma probabilidade de falha diferente de zero. Dessa forma, apesar da

magnitude inferior dos fatores de segurança, o método de equilíbrio limite mostra-se mais conservador, por não indicar nenhuma situação com probabilidade de falha, diferente do observado na análise de elementos finitos.

Tabela 4. Valores de probabilidade de falha e fator de segurança calculado no PLAXIS.

Cenário	Escala de flutuação		S_u			Equilíbrio Limite (M-P)		
	Vertical	Horizontal	Média (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	COV	Média FS (SR fixa)	Média FS (SR flut.)	Probabilidade de falha
0	0.34	10	25.97	1.870	0.07	1.997	1.994	0.00%
1	4.24	10	25.97	1.870	0.07	1.999	1.988	0.00%
2	0.34	10	25.97	7.791	0.30	1.947	1.892	0.00%
3	0.34	10	25.97	12.985	0.50	1.866	1.754	0.00%
4	0.34	10	25.97	18.179	0.70	1.767	1.606	0.00%
5	4.24	100	25.97	1.870	0.07	2.000	1.989	0.00%
6	0.34	100	25.97	1.870	0.07	1.997	1.993	0.00%

Tabela 5. Valores de probabilidade de falha e fator de segurança calculado no ABAQUS.

Cenário	Escala de flutuação		S_u			Elementos Finitos	
	Vertical	Horizontal	Média (kPa)	Desvio Padrão (kPa)	COV	Média FS	Probabilidade de falha
0	0.34	10	25.97	1.870	0.07	2.275	0.54%
1	4.24	10	25.97	1.870	0.07	2.28	0.20%
2	0.34	10	25.97	7.791	0.30	2.22	0.80%
3	0.34	10	25.97	12.985	0.50	2.12	1.80%
4	0.34	10	25.97	18.179	0.70	1.99	3.60%
5	4.24	100	25.97	1.870	0.07	2.28	0.60%
6	0.34	100	25.97	1.870	0.07	2.27	0.60%

4 CONCLUSÃO

Na presente pesquisa foi realizada uma análise de variabilidade para o solo de fundação de um aterro rodoviário localizado no km 30+220 da obra de duplicação da BR 470, situado entre Navegantes/SC e Indaial/SC. O material estudado foi classificado como argila cinza-escuro muito mole, e seus parâmetros geotécnicos obtidos através da análise de ensaios CPTu e de palheta. A análise de variabilidade foi realizada no software PLAXIS, através do método de Monte Carlo, com 5000 simulações, sendo considerada a variabilidade espacial através do método LAS. Dentre os valores de fator de segurança obtidos, o método de Jambu Simplificado gerou os valores mais conservadores, enquanto que os outros métodos resultaram em magnitudes superiores a 1,9.

Na avaliação de diferentes cenários de magnitude da escala de flutuação e desvio padrão, percebeu-se uma pequena influência da escala de flutuação no valor de FS médio, diferente do observado para o desvio padrão, que ocasionou uma alteração mais significativa. Na comparação entre os resultados advindos do método de equilíbrio limite com os do método de elementos finitos, percebe-se que em todos os cenários a média dos fatores de segurança foram inferiores para o primeiro caso. Contudo, através do método de elementos finitos todos os cenários ocasionaram uma probabilidade de falha diferente de zero, ao contrário do encontrado na presente pesquisa. Dessa forma, apesar da magnitude inferior dos fatores de segurança, o método de equilíbrio limite mostra-se mais conservador.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Santa Catarina (FAPESC). Os autores também agradecem ao PET Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cordeiro, R. F. (2019) *Avaliação do comportamento de aterro executado sobre depósito de argila mole na Rodovia BR-470 em Gaspar/SC*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Dienstmann, G.; Cordeiro, R. F.; Sakamoto, M. Y. (2021) Compressibility and stability analysis of an embankment on soft soil: a case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 175, n. 6, p. 1–22.
- Fenton, G. A.; Griffiths, D. V. (2008) *Risk assessment in geotechnical engineering*. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd.
- Fenton, G. A.; Vanmarcke, E. H. (1990) Simulation of random fields via local average subdivision. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n. 8, p. 1773–1749.
- Perini, L. (2021) *Caracterização da variabilidade de rejeitos de mineração de ouro e sua influência na análise do efeito da velocidade no ensaio CPTu*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Schnaid, F. (2009) *In situ testing in geomechanics - the main tests*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. (2012) *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto.
- Uzielli, M. (2022) Non-deterministic interpretation and applications of CPT testing data. In: *Cone Penetration Testing 2022*. Boca Raton: CRC Press, p. 81–93.
- Uzielli, M. et al. (2007) Soil variability analysis for geotechnical practice. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, p. 1653–1752.
- Vanmarcke, E. (1983) *Random fields, analysis and synthesis*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Ziesmann, N. (2023) *Análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros sobre solos moles*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.