Análise Probabilística de Aterro sobre Solos Moles
Probability Analysis of Embankment on Soft Soil

Patrícia Rodrigues Falcão[1†], Diego de Freitas Fagundes[2], Antônio Marcos de Lima Alves[1]

[1]*Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil*
[2]*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil*
[†]**Autor correspondente:** falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Resumo

Nenhum modelo prevê perfeitamente a realidade de um determinado sistema; consequentemente, os cálculos em engenharia têm incertezas, que, por conseguinte vão repercutir diretamente em erros de diversos tipos. Em especial, as obras sobre depósitos de argilas moles apresentam uma alta dificuldade devido ao comportamento caracterizado por elevada compressibilidade e baixa resistência desse solo. Os projetos geotécnicos de aterros sobre solos moles são tradicionalmente analisados por intermédio de um fator de segurança global obtido por meio de métodos determinísticos, não incorporando as incertezas inerentes no cálculo. Já a abordagem probabilística possibilita a quantificação das incertezas oriundas da variabilidade dos parâmetros, bem como a avaliação mais abrangente do nível de segurança esperado para a obra através da probabilidade de falha. Desse modo, é possível desvincular a ideia que altos valores de fator de segurança sempre garantem projetos mais seguros. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar as soluções obtidas pelos Métodos Probabilísticos de Rosenblueth, Monte Carlo, Hipercubo Latino e *First Order Second Moment* (FOSM), além de avaliar os resultados pela abordagem determinística pelos métodos de Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern & Price. As análises referentes a estabilidade foram realizadas com o auxílio da ferramenta computacional Slide v.6. Os resultados oriundos das análises evidenciam a importância da inserção do coeficiente de variação nos parâmetros, já que a incerteza repercute diretamente no nível de desempenho esperado para a obra.

Palavras-chave

Solos moles • Métodos Determinísticos • Métodos Probabilísticos • Probabilidade de Falha

Abstract

No model correctly predicts a given system's reality, so that the engineering calculations have uncertainties, which may cause several kinds of errors. The constructions on soft clay deposits present a high difficulty due to such soil's high compressibility and low resistance. The geotechnical designs of embankments on soft soils are traditionally analyzed using a global safety factor obtained through deterministic methods, not incorporating the calculation's inherent uncertainties. On the other hand, the probabilistic approach makes it possible to quantify the uncertainties arising from the parameters' variability and the more comprehensive assessment of the expected safety level for the work through the probability of failure. In this way, it is possible to untie the idea that high safety factor values always guarantee safer projects. In this context, this study aims to compare the solutions obtained by the Probabilistic Methods of Rosenblueth, Monte Carlo, Latin Hypercube, and First Order Second Moment (FOSM), in addition to evaluating the results by means of a deterministic approach using the methods of Bishop Simplified, Janbu Simplified, Spencer and Morgenstern & Price. Stability analyses were performed using the Slide v.6 computational tool. The analyses show the importance of introducing the coefficient of variation in the parameters since the uncertainty directly affects the level of performance expected for the work.

Keywords

Soft soil • Deterministic Methods • Probabilistic Methods • Failure Probability

1 Introdução

Na implantação de obras rodoviárias é comum a presença de solos de alta compressibilidade, como depósitos de argilas moles. Por consequência, as construções sobre esses solos enfrentam as incertezas oriundas do desconhecimento do real comportamento do solo, já que a variabilidade do perfil geotécnico, os métodos de análise escolhidos e a quantidade e qualidade dos ensaios realizados são fatores determinantes no cálculo. A análise de estabilidade é primordial na engenharia geotécnica devido aos impactos negativos associados a rupturas. No entanto, a maioria das análises são tradicionalmente avaliadas por intermédio da abordagem determinística, ou seja, não incorporando as incertezas intervenientes no cálculo.

A variabilidade dos parâmetros geotécnicos já vem sendo reconhecida há algum tempo [1]. Sob esse viés, os conceitos embasados na abordagem probabilística vêm sendo amplamente desenvolvidos [2, 3, 4, 5]. Entretanto, não é comum a aplicação desse conhecimento ao analisar e projetar estruturas geotécnicas, já que a cultura determinística é dominante [3].

A variabilidade geotécnica é um atributo complexo que resulta em inúmeras fontes de incerteza [6]. Face a esse panorama, ao definir um valor absoluto as variações são desprezadas, e isso acarreta que altos valores de fator de segurança (FS) podem ocultar um baixo índice de confiabilidade, justificando vários casos de ruptura em obras consideradas estáveis. Por conseguinte, a abordagem probabilística fornece uma maneira de quantificar as incertezas e tratá-las de forma consistente. Neste contexto, o presente estudo tem como propósito apresentar uma retroanálise probabilística, pelos métodos de Monte Carlo, Hipercubo Latino, Estimativas Pontuais (Rosenblueth) e *First Order Second Moment* (FOSM), do estudo de caso de um aterro construído sobre solos moles, localizado no estado de Santa Catarina—Brasil. O mesmo visa demonstrar as vantagens da utilização da abordagem probabilística em complemento à tradicional forma de análise de estabilidade determinística.

Inicialmente, para esse trabalho, foram estipulados os parâmetros geotécnicos através da interpretação de ensaios realizados em campo (SPT, CPTu e Vane Test). Posteriormente, foi realizado um estudo das incertezas que abrangem o projeto do aterro. Para os quatro métodos sugeridos nesse estudo, foi utilizada a ferramenta computacional Slide versão 6, além do programa Excel para complementar o cálculo da probabilidade de falha (PF). Por fim, a partir dos resultados obtidos, o aterro sobre solos moles será classificado de acordo com o nível de segurança esperado, visando exemplificar a importância da análise quanto ao risco geotécnico.

A abordagem probabilística possibilita aperfeiçoar a análise quanto a estabilidade global, uma vez que permite a contabilização do grau de incerteza das variáveis, obtendo assim uma probabilidade de falha que proporciona a avaliação quanto ao risco de ruptura da obra. Portanto, essa análise é uma alternativa complementar para os resultados obtidos por intermédio dos métodos determinísticos, visto que tem como objetivo diminuir o impacto causado pelas rupturas por meio de uma análise mais aprofundada da segurança do projeto.

2 Materiais e Métodos

Esse item objetiva apresentar uma breve revisão dos conceitos de cálculo que darão suporte aos estudos realizados, focando nos pontos relevantes para esse artigo. Por conseguinte, serão abordadas as metodologias de cálculo determinísticas e probabilísticas, bem como os conceitos referentes ao índice de confiabilidade e probabilidade de falha.

2.1 Métodos Determinísticos

Em geral, nos projetos de aterros sobre solos moles, a análise de estabilidade é realizada por intermédio de métodos determinísticos, sendo usual a utilização do método de equilíbrio limite, que se resume na determinação de um FS mínimo para a superfície de ruptura. Esse resultado pode variar de acordo com o método escolhido, já que eles diferem quanto à forma da superfície de ruptura e, principalmente, quanto às hipóteses simplificadoras adotadas.

2.2 Métodos Probabilísticos

Os métodos probabilísticos permitem considerar as incertezas inerentes no cálculo, por meio de uma caracterização mais ampla do local. Esse tipo de análise possibilita uma maior confiabilidade para o cálculo, já que é possível associar o FS a uma PF e consequente aos níveis de risco que a obra está submetida.

A PF de determinado estudo de estabilidade é definida como o número de análises que resultam o FS inferior a um, dividido pelo número total de análises. O índice de confiabilidade pode ser definido como um indicador do número de desvios padrão que separam o FS médio do FS crítico (FS = 1,0). Para calcular o β assumindo uma distribuição estatística normal é utilizada a equação a seguir:

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \tag{1}$$

sendo β o índice de confiabilidade, μ_{FS} o fator de segurança médio e σ_{FS} o desvio padrão. O nível de desempenho da obra pode ser verificado por meio da Tabela 1. Em geral, na prática de engenharia, é considerado que a obtenção de um fator de segurança superior ao estipulado garante a confiabilidade da obra. Entretanto, esse FS pode estar condicionado a um amplo espectro de falha.

Tabela 1: Nível de desempenho esperado [7].

Nível de desempenho	Alto	Bom	Acima da média	Abaixo da média	Pobre	Insatisfatório	Perigoso
Índice de Confiabilidade	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Probabilidade de Falha	0,0000003	0,00003	0,001	0,006	0,023	0,07	0,16

2.2.1 Método FOSM (*First Order Second Moment*)

O método *First Order Second Moment* (FOSM) é frequentemente utilizado em estudos geotécnicos, sendo desenvolvido a partir da expansão da série de Taylor, para a determinação da distribuição probabilística de uma função com um número n de variáveis aleatórias. A vantagem de utilizar essa ferramenta de cálculo é a necessidade de se conhecer apenas os valores dos momentos das distribuições estatísticas (média e desvio padrão) dos parâmetros em questão.

A Eq. (2) apresenta o procedimento de cálculo elaborado a partir da variação do FS motivado por uma pequena escala de oscilações nas variáveis independentes. Por conseguinte, enquanto é realizado a porcentagem de acréscimo em uma variável, as demais são mantidas fixas. O número de análises necessárias pelo método corresponde a $n + 1$, sendo n o número de valores independentes. Consequentemente uma das avaliações é realizada para os valores médios e as demais para definir as derivadas ($\delta FS_i/\delta x_i$) de cada uma das variáveis:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta FS_{ii}}{\delta X_i}\right)^2 V[Xi], \tag{2}$$

onde $V[FS]$ equivale à variância do FS. Ainda na Eq. (2), δFS_{ii} corresponde à variância do FS quando as variáveis do estudo são variadas em δX_i e $V[Xi]$ significa a variância de cada uma das variáveis (Xi).

2.2.2 Método de Rosenblueth (Estimativas Pontuais)

O Método probabilístico de Estimativas Pontuais é uma alternativa desenvolvida por Rosenblueth [8] para o método da Série de Taylor (FOSM) [9], sendo assim uma ferramenta simplificada, que somente não será eficaz se houver uma grande dispersão das variáveis.

Em síntese, o método consiste em estimar os momentos da variável dependente em função das variáveis aleatórias independentes, uma vez que seja conhecido pelo menos dois de seus momentos (média e desvio padrão), ou as suas respectivas estimativas. De acordo com Rosenblueth [8] a distribuição de uma variável aleatória X_i é concentrada em dois pontos particulares apresentados nas Eqs. (3) e (4):

$$X_{i+} = \overline{X_i} + \sigma_i \tag{3}$$

$$X_{i-} = \overline{X_i} - \sigma_i \tag{4}$$

sendo que $\bar{X}_i$ corresponde ao valor médio da distribuição da variável X_i e o desvio padrão da distribuição da variável X_i é representado por σ_i. O método, na condição de n variáveis correlacionadas, requer 2^n valores considerados para cada combinação dos pontos particulares X_{i+} e X_{i-}. Concluída a fase de combinação dos pontos particulares, é então iniciado o procedimento probabilístico para cada combinação por intermédio da análise de estabilidade determinística. Assim, para cada nova etapa do processo probabilístico, os cálculos determinísticos são alimentados por um grupo de novos valores (dados) de entrada a serem utilizados no próximo cálculo [3].

2.2.3 Método de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo consiste em gerar aleatoriamente um número (N) de valores para os (n) parâmetros de incertezas que fazem parte do modelo estudado. Os dados necessários para a análise são a média, desvio padrão e os valores mínimos e máximos para cada variável. O número de iterações requeridos pode ser determinado através da Eq. (5) proposta por Harr [10]. Ela depende do nível de confiança (α) admitido para a situação em estudo.

$$N_{MC} = \left[\frac{Z^2}{4\alpha^2}\right]^n \tag{5}$$

sendo que N_{MC} corresponde ao número de iterações a serem realizadas, Z é o valor da distribuição normal para o nível de significância α (nível de confiança) e n é o número de variáveis estatísticas do sistema.

2.2.3 Método Hipercubo Latino

O método Hipercubo Latino proporciona uma amostragem da distribuição de probabilidade suavizada. Os resultados oriundos dessa metodologia são comparáveis com os valores resultantes da utilização do método de Monte Carlo, entretanto com uma quantidade reduzida de simulações. Sob essa perspectiva, em geral, para a obtenção de resultados da mesma magnitude ou melhores dos que os obtidos por meio método de Monte Carlo são utilizados 1/3 das iterações do método supracitado.

3 Estudo de Caso

3.1 Análise e interpretação dos resultados dos ensaios de campo

Aterros construídos sobre depósitos de argilas moles são considerados obras de alta complexidade devido à baixa resistência e alta compressibilidade do solo. Mediante ao exposto, é imprescindível a interpretação adequada dos ensaios.

Com base na análise do ensaio de piezocone foi possível realizar a avaliação do tipo de solo através do ábaco de identificação proposto por Robertson [11]. Esse sistema de classificação correlaciona a resistência normalizada (*Qt)* com a razão de atrito (*Fr)* e *Qt* com o parâmetro de poro pressão (*Bq*), e é indicado como guia do comportamento do solo e deve ser ajustado com base na experiência local. Por consequência, nesse estudo, a estimativa do perfil geotécnico do local, foi realizada analisando de maneira conjunta os resultados do ensaio SPT e CPTu (Fig. 1).

Conforme apresentado na Fig. 1, entre as profundidades de 4 e 21 m, os valores de *Nspt* variam entre 0 e 1, limitando a aplicabilidade desse ensaio para a estimativa dos parâmetros de projeto. Com isso, as propriedades de comportamento da argila foram investigadas através de ensaios de campo (piezocone e palheta). A estimativa da resistência não drenada por meio das medidas de CPTu foi realizada adotando-se um valor de fator de capacidade do cone (NKT) igual a 19, definido com base no ensaio de palheta, conforme apresentado na Fig. 2.

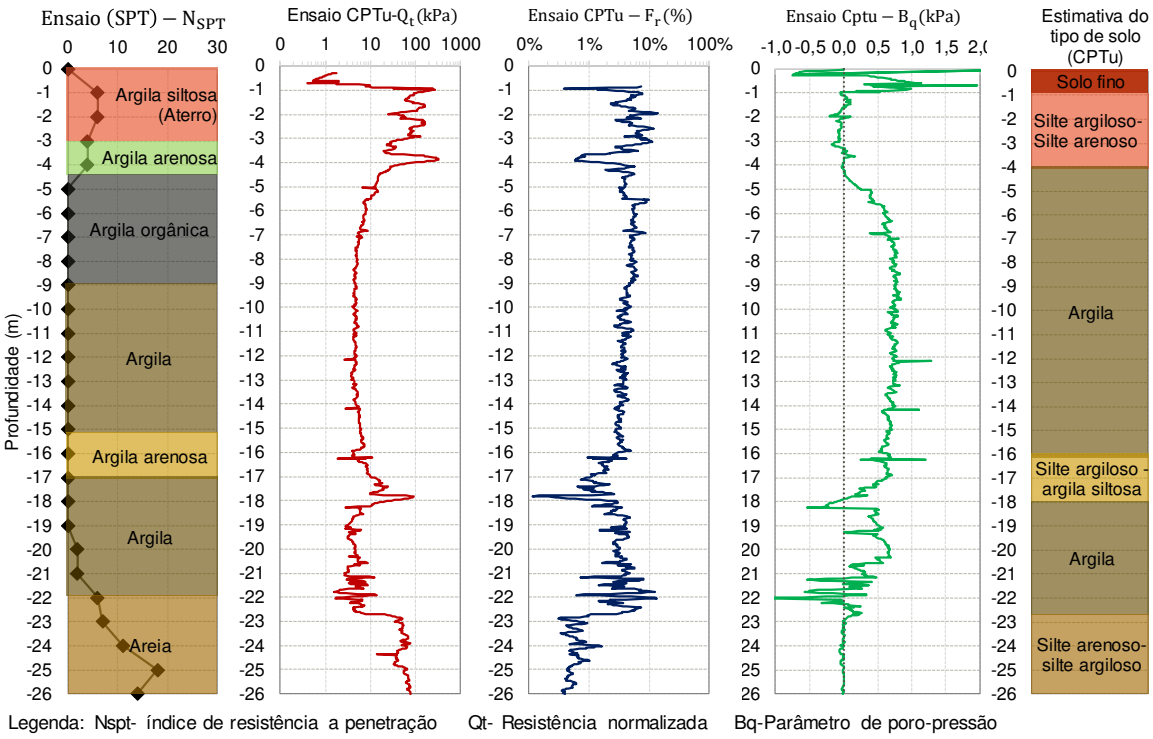


Figura 1: Análise do perfil típico do terreno natural pelos ensaios SPT e CPTu.

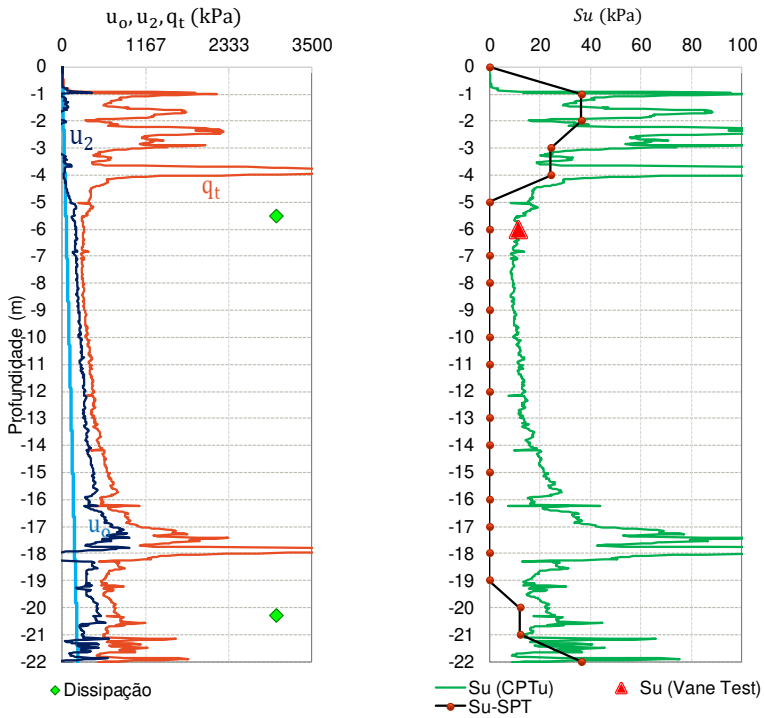


Figura 2: Avaliação dos resultados dos ensaios de campo.

Acrescentam-se à Fig. 2 os valores da resistência não drenada estimados a partir da sondagem SPT. Cabe ressaltar a falta de representatividade dos valores medidos no ensaio, logo a relação entre Su e Nspt não é recomendada para solos moles, já que para uma faixa de variação entre 0 e 5, tal ensaio não é representativo [12].

3.2 Descrição do sistema em análise

Analisando a Fig. 1, o solo de fundação do aterro foi separado em duas camadas principais (mistura de siltes e argila mole), sendo os parâmetros definidos através dos ensaios de campo. Já para o aterro foram utilizados valores representativos de argilas compactadas. A Fig. 3 apresenta o caso em estudo com suas respectivas propriedades.

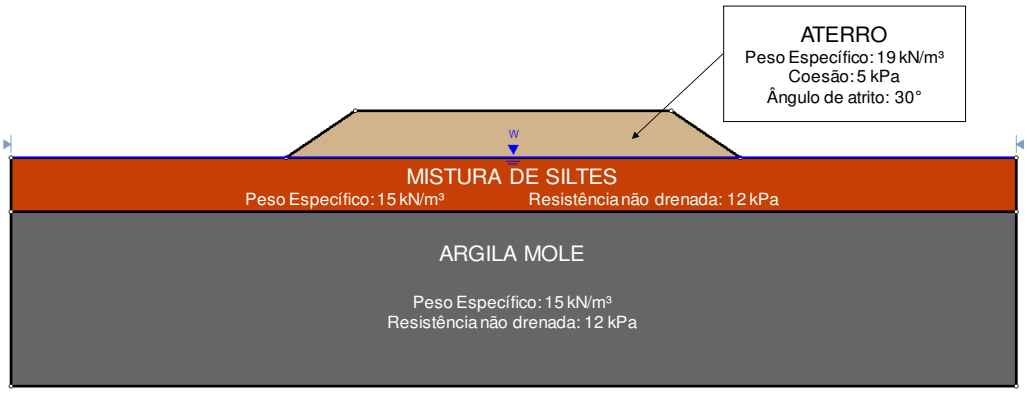


Figura 3: Seção típica utilizada.

4 Resultados e Discussão

Para as análises de estabilidade foi utilizado o programa Slide v.6. O presente estudo foi realizado tendo em vista as seguintes linhas de análise: determinística e probabilística. Para todos os métodos probabilísticos em análise foi adotado a distribuição normal.

Para as análises pelo Método de Monte Carlo, utilizando a distribuição normal, os valores aleatórios foram tomados ao redor do valor médio em uma faixa de largura igual a três desvios padrão, o que cobre 99,70% de todas as amostras, garantindo assim uma distribuição bem definida. O programa Slide v.6 avalia uma única superfície de ruptura (superfície crítica determinística) ou todas as superfícies de ruptura possíveis ("*overall slope*"). Ao optar pelo segundo tipo de análise, é repetida N vezes a pesquisa para a superfície mínima global probabilística. Definido o número de amostras (N), para cada iteração é utilizado um conjunto de dados diferentes das variáveis aleatórias, sendo assim, em cada busca é gerada uma nova superfície probabilística global mínima. Nas análises desse trabalho, optou-se por avaliar a probabilidade de falha para todas as superfícies probabilísticas possíveis, já que, muitas vezes, a superfície crítica determinística não apresenta o menor índice de confiabilidade nos métodos probabilísticos. Os valores dos coeficientes de variação são idênticos para os métodos de Monte Carlo e Hipercubo Latino.

Nas análises determinísticas pelo método FOSM foi imposto um incremento de mais 10% nos parâmetros envolvidos no cálculo da variância do fator de segurança, segundo a sugestão de Sandroni e Sayão [13]. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados como dados de entrada em cada método analisado. Foram utilizados os valores médios de coeficiente de variação propostos por Assis et al. [14].

Tabela 2:Valores utilizados como dados de entrada em cada método analisado.

Parâmetro	Média	Cov (%)	Desvio Padrão	Método de Monte Carlo/ Hipercubo Latino		Método FOSM	Método de Rosenblueth	
				Relativo Mínimo	Relativo Máximo	Média +10%	Média +Desvio Padrão	Média - Desvio Padrão
Aterro-Ângulo de atrito efetivo (°)	30	10	3	21,00	39,00	33,00	33,00	27,00
Aterro-Peso específico (kN/m³)	19	3	0,57	17,29	20,71	20,90	19,57	18,43
Aterro-Coesão (kPa)	5	40	2	-1,00	11,00	5,50	7,00	3,00
Siltes-Resistência não drenada (kPa)	36	30	10,8	3,60	68,40	39,60	46,80	25,20
Siltes-Peso específico (kN/m³)	14	3	0,42	12,74	15,26	15,40	14,42	13,58
Argila- Resistência não drenada (kPa)	12	30	3,6	1,20	22,80	13,20	15,60	8,40
Argila- Peso específico (kN/m³)	15	3	0,45	13,65	16,35	16,50	15,45	14,55

4.1 Análise da relevância dos parâmetros geotécnicos no cálculo probabilístico

O número de iterações necessárias em um estudo probabilístico é importante na medida que influencia diretamente no tempo de análise e nas ferramentas computacionais necessárias. Face ao panorama apresentado, o método FOSM é um mecanismo que auxilia na definição da relevância dos parâmetros geotécnicos no cálculo. Esse procedimento apresenta como vantagem o baixo número de simulações requeridas. A Eq. (2) foi utilizada nos cálculos realizados no estudo de estabilidade pelo método FOSM, os quais são apresentados na Tabela 3, sendo nesse caso, utilizado como exemplo os valores oriundos do método de Morgenstern & Price.

Tabela 3: Valores calculados pelo método FOSM.

X_i	δX_i	δFS_i	$\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}$	$V[X_i]$	$\left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V[X_i]$	Relevância dos parâmetros
Aterro-γ	1,90	0,12	0,06	0,32	0,0012	1,49%
Aterro-ϕ	3,00	0,00	0,00	9,00	0,0000	0,00%
Aterro- c	0,50	0,00	0,00	4,00	0,0000	0,02%
Mistura de Siltes-γ	1,40	0,00	0,00	0,18	0,0000	0,00%
Mistura de Siltes-Su	3,60	-0,04	-0,01	116,64	0,0151	18,95%
Argila Mole-γ	1,50	0,00	0,00	0,20	0,0000	0,00%
Argila Mole- Su	1,20	-0,08	-0,07	12,96	0,0635	79,54%

Por intermédio dos resultados demonstrados na Tabela 3, a variância total do FS corresponde à soma das variâncias para cada variável aleatória, sendo nesse caso igual a 0,870. As soluções obtidas quanto à relevância dos parâmetros geotécnicos para os demais métodos em estudo encontram-se compiladas na Tabela 4, sendo que essa contribuição em porcentagem dos parâmetros é calculada através da razão entre a parcela de cada variável independente sobre a variância total do fator de segurança. Por conseguinte, avaliando-se os resultados, constata-se que a resistência não drenada é o parâmetro que tem maior influência no FS, e que as variáveis restantes não interferem tanto nesse cálculo. Este fato está diretamente relacionado aos maiores valores de coeficiente de variação atribuídos à resistência não drenada.

Tabela 4: Relevância dos parâmetros no cálculo do FS.

Parâmetros	Janbu Simplificado	Bishop Simplificado	Spencer
Aterro-γ	1,70%	0,81%	1,47%
Aterro-ϕ	0,01%	0,00%	0,00%
Aterro- c	0,09%	0,00%	0,02%
Mistura de Siltes-γ	0,00%	0,00%	0,00%
Mistura de Siltes -Su	37,66%	0,00%	18,95%
Argila Mole-γ	0,07%	0,00%	0,00%
Argila Mole- Su	60,54%	99,19%	79,56%

Tendo como objetivo a avaliação gráfica dos resultados obtidos quanto a relevância dos parâmetros geotécnicos, os dados oriundos do método de Monte Carlo foram compilados na Fig. 4. Por conseguinte, a resistência não drenada será considerada como variável aleatória, sendo negligenciados os demais parâmetros devido à sua incerteza ser insignificante mediante aos cálculos.

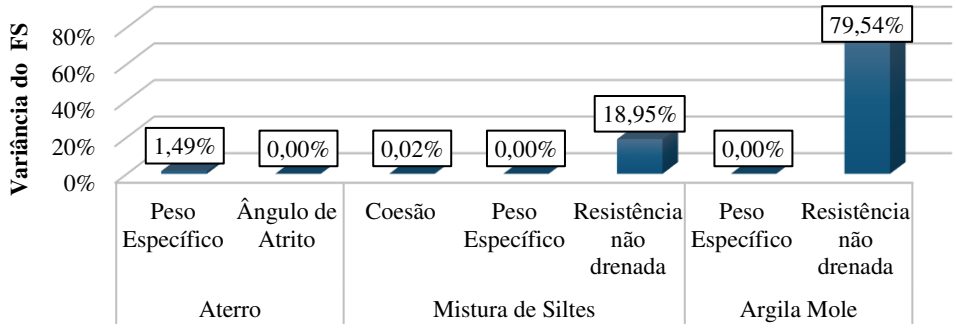


Figura 4: Avaliação gráfica da relevância dos parâmetros geotécnicos no cálculo do FS.

4.2 Análise de estabilidade pelas abordagens determinísticas e probabilísticas

A análise de estabilidade foi realizada por intermédio dos seguintes métodos determinísticos: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern & Price. Para a análise pela abordagem probabilística o estudo foi desenvolvido pelos métodos FOSM, Estimativas Pontuais, Monte Carlo e Hipercubo Latino. Em ambas as situações foi utilizado a ferramenta computacional Slide v.6, para auxiliar o processo de cálculo.

O número de iterações necessárias leva em consideração o número de variáveis em análise, no caso duas (resistência não drenada da argila mole e da mistura de siltes). O valor do número de cálculos a serem realizados para cada método em estudo é apresentado na Tabela 5. Para o método de Monte Carlo, o número de iterações aumenta geometricamente com o nível de confiança e o número de variáveis. Por conseguinte, para esse método, os cálculos foram realizados para α igual a 85%. Para o método do Hipercubo Latino, foi utilizado 1/3 das iterações adotadas no método de Monte Carlo.

Tabela 5: Número de iterações.

Métodos	Equação	Número de iterações
Determinístico	-	1
FOSM	n+1	3
Rosenblueth	2^n	4
Monte Carlo	Eq. (5)	531
Hipercubo Latino	1/3 × Eq. (5)	177

A partir dos resultados obtidos quanto ao número de iterações necessárias em cada método, foi possível realizar a próxima etapa, que consistiu no cálculo do FS e desvio padrão para cada situação estudada. Os resultados são apresentados na Tabela 6, onde é observado que para os métodos de Morgenstern & Price, Janbu Simplificado e Spencer há uma proximidade nos valores obtidos de FS entre os métodos Determinístico, de Monte Carlo e FOSM e uma dispersão em torno de 10% quando comparado com o método de Rosenblueth. Já para o método de Bishop simplificado os resultados entre os métodos se mantiveram semelhantes.

Tabela 6: Valores médios do FS.

Métodos	Bishop Simplificado	Janbu Simplificado	Spencer	Morgenstern & Price
	FS	FS	FS	FS
Determinístico	1,148	1,312	1,269	1,269
FOSM	1,129	1,314	1,270	1,270
Rosenblueth	1,125	1,177	1,162	1,162
Monte Carlo	1,178	1,321	1,276	1,279
Hipercubo Latino	1,122	1,239	1,210	1,211

Para os métodos FOSM e Rosenblueth o cálculo da PF foi complementado a partir do programa Excel, através dos dados da média e desvio padrão obtidos na análise do FS. O índice de confiabilidade foi calculado através da Eq. (1). Os resultados para a PF e o β são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Relevância dos parâmetros no cálculo do FS.

Métodos	Bishop Simplificado		Janbu Simplificado		Spencer		Morgenstern & Price	
	β	PF	β	PF.	β	PF.	β	PF.
Determinístico	-	-	-	-	-	-	-	-
FOSM	0,431	33,46%	1,145	12,72%	0,957	17,05%	0,957	17,05%
Rosenblueth	0,925	17,76%	0,535	29,65%	0,440	32,96%	0,441	32,96%
Monte Carlo	0,461	31,07%	0,942	22,60%	0,750	30,51%	0,750	30,51%
Hipercubo Latino	0,379	34,46%	0,8910	24,29%	0,702	33,33%	0,703	32,77%

Os valores de probabilidade de falha, apresentados na Tabela 7, foram plotados e são demonstrados de maneira gráfica através da Fig. 5. Mediante a interpretação dos resultados é possível identificar que o método do Hipercubo Latino apresentou os maiores valores para a PF para os métodos de Bishop Simplificado e Spencer. Já para os métodos de Janbu Simplificado e Morgenstern & Price o valor mais conservador foi obtido por intermédio do método de Rosenblueth.

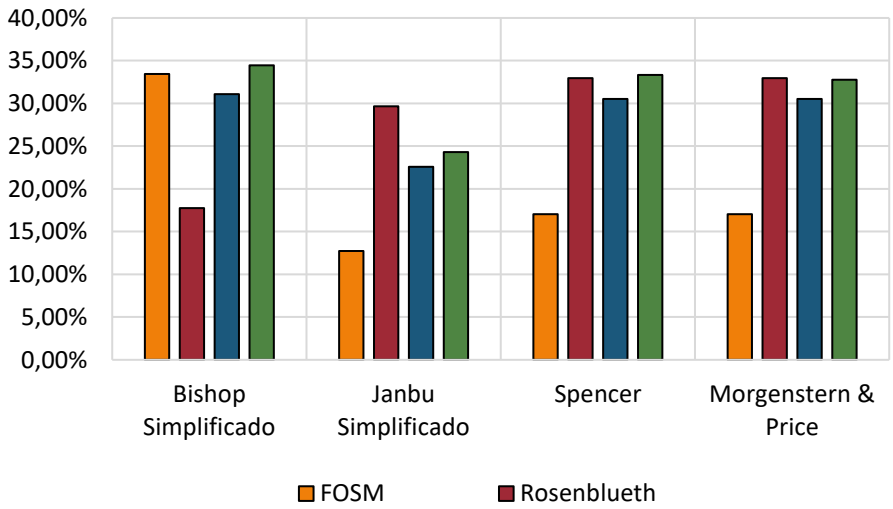


Figura 5: Avaliação gráfica da probabilidade de falha.

O método Hipercubo Latino utiliza em sua metodologia uma amostragem estratificada, cerca de 1/3 das iterações necessárias no método de Monte Carlo. No entanto, conforme observado na Fig. 5, a oscilação em torno dos valores é pequena, cerca de 2% entre os métodos. Os resultados obtidos pelo método do Hipercubo Latino foram superiores em todas as análises aos do método de Monte Carlo.

A Figura 6 apresenta um gráfico de barras com os valores de índice de confiabilidade em conjunto com os valores de FS. Por conseguinte, a avaliação da figura enfatiza a necessidade de se analisar os parâmetros determinísticos em conjunto com uma análise confiabilidade, já que apenas o FS não retrata a variabilidade inerente no sistema. Já pelo método de Morgenstern & Price, todos os valores de β foram inferiores a 1, o que de acordo com a Tabela 1 indica um comportamento previsto para a obra de perigoso.

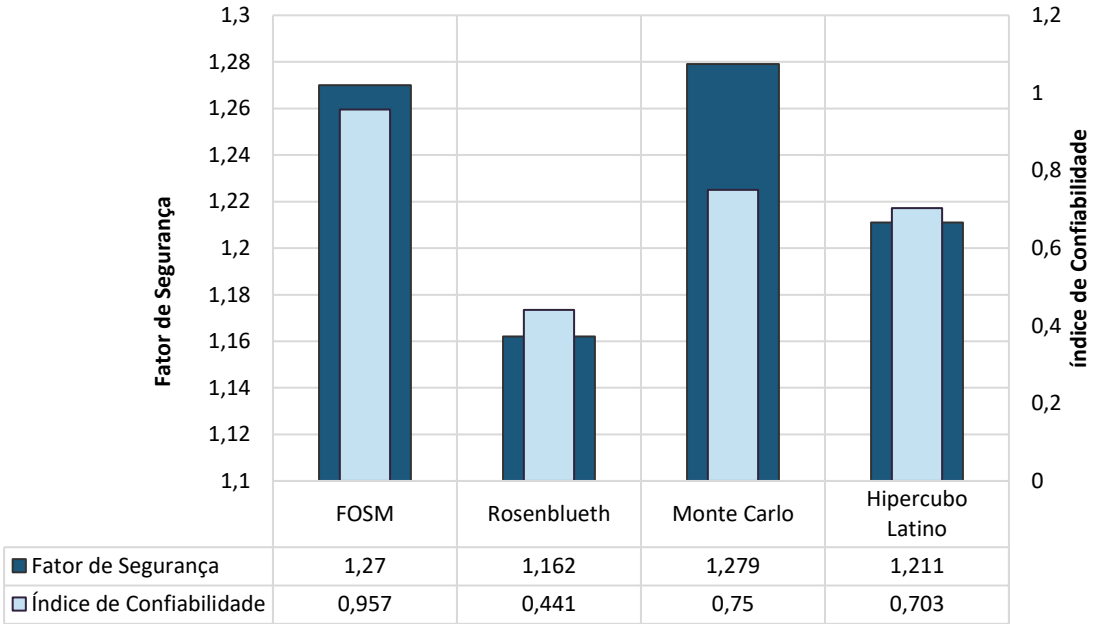


Figura 6: Comparação entre o índice de confiabilidade e o fator de segurança.

5 Conclusões

Esse estudo teve como finalidade a análise de estabilidade de um aterro sobre solos moles utilizando métodos probabilísticos. Essa metodologia de cálculo permitiu considerar a variabilidade dos parâmetros dos materiais, o que destaca a importância desse tipo de análise frente a abordagem determinística.

Avaliando os métodos determinísticos empregados é possível concluir que os métodos de Spencer e Morgenstern & Price apresentam resultados semelhantes, em consequência de ambos satisfazerem todas as equações de equilíbrio e possuírem condições de contorno semelhantes. O método de Janbu Simplificado apresentou resultados similares aos dos métodos mais rigorosos.

Em um projeto geotécnico o valor da probabilidade de falha é relativo, já que depende diretamente do número de variáveis analisadas, dos métodos determinísticos e probabilísticos empregados e do tipo da função distribuição de probabilidade adotada. Para os métodos probabilísticos em estudo (FOSM, Rosenblueth, Monte Carlo e Hipercubo Latino) o índice de confiabilidade ficou, em geral, inferior a 1, o que de acordo com a Tabela 1 implica em um nível esperado de desempenho perigoso.

O método FOSM apresenta como vantagem a simplicidade na metodologia de cálculo, além de ser o único método que permite verificar a relevância dos parâmetros no cálculo do FS. Com isso, sugere-se que primeiramente seja aplicado esse método e posteriormente os resultados sejam complementados com outros métodos probabilísticos, em razão dele ser um método indireto e sofrer aproximações em sua formulação. O método de Monte Carlo é o mais rigoroso e apresenta como benefício permitir um alto número de iterações para uma mesma análise, no entanto quanto maior o número de variáveis analisadas maior é o tempo de processamento. O Método de Rosenblueth é um método indireto, portanto menos exigente do que o de Monte Carlo.

O método do Hipercubo Latino mostrou-se uma ferramenta eficiente em relação aos demais métodos, mesmo tendo uma amostragem estratificada. Contudo, os valores de probabilidade de falha foram superiores aos demais nas análises, sendo ele o método mais conservador no estudo.

Avaliando os resultados obtidos pelos métodos determinísticos mais rigorosos (Spencer e Morgenstern & Price), conclui-se que os resultados obtidos pelo método FOSM, devido a aproximações sofridas na sua formulação, apresentaram uma maior diferença em relação ao Método de Monte Carlo e de Rosenblueth.

Por fim, embora o FS calculado seja alto, não é possível excluir a possibilidade de ruptura. Já que a elevada variabilidade das incertezas inerentes no cálculo depende diretamente da natureza dos elementos geotécnicos, ensaios realizados, metodologia de análise entre outros. Isso ressalta a importância da análise probabilística.

Referências

[1] Lumb, P., "The variability of natural soils," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 74-97, 1966. Disponível em: https://doi.org/10.1139/t66-009.

[2] Ang, A.H-S, e Tang, W. H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles". 1 ed., New York,United States, Johm Wiley & Sons. 1975.

[3] Assis, A. P., "Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice," *Soil and Rocks*, vol. 43, no. 3, pp. 311-336, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.28927/SR.433311.

[4] Phoon. K. K., e Kulhawy. F. H., "Characterization of geotechnical variability," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 612-624, 1999a. Disponível em: https://doi.org/10.1139/t99-038.

[5] Phoon. K. K., e Kulhawy. F. H., "Evaluation of geotechnical variability," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, no. 4, pp. 625-639, 1999b. Disponível em: https://doi.org/10.1139/t99-039.

[6] Duncan, M., "Factors of safety and reliability in geotechnical engineering," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 307-16, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307).

[7] U. S Army Corps Engineers, Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering, Department of the Army, Washington, United States, 1997.

[8] Rosenblueth, E., "Point Estimates for Probability Moments," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 72, no. 10, pp. 3812-3814, 1975. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.72.10.3812.

[9] Maia, J. A. C., "Modelagem Probabilística da Zona Plástica de Obras Subterrâneas em Meios Rochosos", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2007. Disponível em: https://repositorio.unb.br/.

[10] Harr, M. E., "Reliability Based Design in Civil Engineering", 1 ed, McGraw-Hill. New York, United States, 1987.

[11] Robertson, P. K., "Soil classification using the cone penetration test," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 151-158, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1139/t90-014.

[12] Schnaid, F., e Odebrecht, E., "Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações", 2 ed., São Paulo, Brasil. Oficina de Textos. 2012.

[13] Sandroni, S. S., Sayão, A. S. F., "The Use of Relative Probability of Failure in the Design of Open Pit Mine Slopes", Innovative Mine Design for the 21st Century, pp. 21-24, 1993.

[14] Assis, A. P., Espósito, T. J., Gardoni, M. G., Silva, P. D. E. A., e Maia, J.A.C., "Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia", Apostila do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2012.