



Ana Luiza Rossini Valente de Oliveira

**Avaliação da segurança de um quebra-
mar sobre argila mole**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
da PUC-Rio

Orientador: Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Rio de Janeiro

Julho de 2018



Ana Luiza Rossini Valente de Oliveira

**Avaliação da segurança de um quebra-mar
sobre argila mole**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental– PUC-Rio

Prof. Sandro Salvador Sandroni

Sandro Sandroni Engenheiros Associados Ltda

Prof^a. Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcelo Motta de Freitas

Departamento de Geografia – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de julho de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Ana Luiza Rossini Valente de Oliveira

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2015. Ingressou no mestrado da PUC-Rio em 2016, na área de Geotecnia. Concentrou sua pesquisa na área de Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Ana Luiza Rossini Valente de

Avaliação da segurança de um quebra-mar sobre argila mole / Ana Luiza Rossini Valente de Oliveira; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão. – 2018.

93 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil e ambiental - Teses. 2. Probabilidade de ruptura. 3. Índice de confiabilidade. 4. Tensões totais. 5. Tensões efetivas. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Pelo amor constante e
incondicional, dedico essa
dissertação à minha família.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida e pela minha saúde.

Aos meus pais Maria Tereza e José Carlos, pelo incentivo incessante em cada passo profissional e por estarem ao meu lado em absolutamente todos os momentos.

Vocês que fortalecem e me motivam a ser um ser humano cada vez melhor.

À minha irmã Júlia, que mesmo com sua juventude, carrega uma maturidade que me surpreende e é uma fonte de inspiração para mim.

Ao meu grande companheiro e amigo Rafael Grilo, que acredita comigo na concretização dos sonhos, me ajudando a enxergar de forma mais suave os obstáculos da vida.

Aos meus antigos amigos, por compreenderem os momentos de ausência necessários e me incentivarem à busca pelo título de mestre.

Aos novos amigos que a PUC-Rio me deu: Andrea, Mariana, Luana, Carol, Raquel, Larissa, Jainor, Raul, Bruno, Alan e Arthur Amaral, por terem sido tão companheiros tanto nos momentos de estudos e de dificuldades, quanto nos momentos de diversão. Vocês marcaram mais do que imaginam a minha vida, e certamente tenho todos em meu coração.

Agradeço especialmente a Andrea Vecchi e Mariana Bernardo pelos momentos de discussão profundos e filosóficos sobre mecânica dos solos e estatística, e por proporcionarem grande alívio de carga emocional ao longo da dissertação.

Ao meu orientador, Alberto Sayão, que sempre se mostrou presente e conduziu de maneira muito atenciosa a orientação, com muita transmissão de conhecimento.

Ao professor Sandro Sandroni, pela ajuda e fornecimento de material para realização da pesquisa.

À empresa Terratek, onde agreguei experiência e tive muita compreensão nos momentos que necessitei me ausentar para cumprir com meus deveres na PUC. Obrigada especialmente ao Alberto Ortigão e aos colegas Fábio Marinho, Halleylton Ribeiro, Alexandre Schuler e Daniel Haas.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, por me proporcionar tanto conhecimento e por toda ajuda necessária. Ao CNPq e à CAPES, pelo apoio financeiro e oportunidade de desenvolvimento profissional.

Resumo

De Oliveira, Ana Luiza Rossini Valente; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Orientador). **Avaliação da segurança de um quebra-mar sobre argila mole**. Rio de Janeiro, 2018. 93p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação de análises probabilísticas na avaliação da estabilidade de taludes, com base no caso da ruptura de um quebra-mar construído sobre argila mole no Terminal Portuário de Sergipe, em outubro de 1989. Realizou-se uma análise estatística das características geotécnicas dos materiais presentes na obra, enfatizando a variabilidade inerente dos dados. Nas análises probabilísticas, foram adotados três métodos: FOSM, Estimativas Pontuais e Simulação de Monte Carlo. São apresentados os conceitos básicos de confiabilidade e probabilidade de ruptura e as hipóteses e etapas de cálculo consideradas em cada método. Discutem-se brevemente os diferentes métodos de equilíbrio limite utilizados para superfícies poligonais de ruptura. Três cenários foram estudados, em relação aos procedimentos adotados: análises em tensões totais, com a resistência da argila mole obtida por ensaios de campo e laboratório; análises em tensões efetivas, com o ângulo de atrito da argila oriundo de ensaios triaxiais, e análises em tensões efetivas, com o ângulo de atrito da argila obtido de retroanálise da ruptura ocorrida na obra. Observou-se que para os três cenários os valores de probabilidades de ruptura foram, respectivamente, da ordem de: 1/70, 1/2100 e 1/30. Além disso, ao considerar as metodologias de cálculo probabilístico por FOSM e Estimativas Pontuais, os resultados foram mais conservadores em relação a Simulação de Monte Carlo.

Palavras-chave

Probabilidade de ruptura; índice de confiabilidade; tensões totais; tensões efetivas.

Abstract

De Oliveira, Ana Luiza Rossini Valente; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim (Advisor). **Safety assessment of a breakwater on soft clay**. Rio de Janeiro, 2018. 93p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims at applying available methods of probabilistic analysis for assessing the stability of a breakwater built on soft clay at the Sergipe Terminal, gathering information on the existent materials in the field and a statistical analysis of the geotechnical parameters, emphasizing the inherent variability as part of the research. Three probabilistic techniques of analysis have been used: FOSM, Point Estimates and Monte Carlo Simulation. The hypotheses, calculation steps and basic concepts of reliability index and probability of failure are presented, with brief discussions on the different limit equilibrium procedures used for polygonal surfaces. Three scenarios were studied, regarding the soft clay parameters: total stress analysis, considering undrained loading, effective stress analysis with effective friction angle from triaxial tests, and effective stress analysis with effective friction angle from back analysis of a previous failure. For the three scenarios, the probability of failure values were, respectively around: 1/70, 1/2100 and 1/30. Besides this, when using the FOSM and Point Estimates probabilistic techniques, the results proved to be more conservative, in comparison to Monte Carlo Simulation.

Keywords

Probability of failure; reliability index; total stress; effective stress.

Sumário

1 Introdução	17
1.1. Considerações Iniciais	17
1.2. Objetivos do Estudo	19
1.3. Estrutura do Trabalho	19
2 Revisão Bibliográfica	20
2.1. Estabilidade de Taludes	20
2.1.1. Métodos de Equilíbrio Limite	21
2.1.2. Abordagem Determinística x Abordagem Probabilística	25
2.2. Conceitos Fundamentais da Estatística e Probabilidade	26
2.2.1. Estatística	26
2.2.2. Probabilidade	28
2.3. Métodos Probabilísticos para Aplicação Geotécnica	31
2.3.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM)	31
2.3.2. Método das Estimativas Pontuais (ou Rosenblueth) - EP	34
2.3.3. Simulação de Monte Carlo	35
2.4. Confiabilidade e Risco de Ruptura	36
2.5. Trabalhos Anteriores	39
3 Estudo de Caso: Análise da Estabilidade de um Quebra-mar sobre Argila Mole – Porto de Sergipe	43
3.1. Apresentação da Obra	43
3.2. Características Geológico-Geotécnicas	44
3.3. Seção Típica	46
3.4. Parâmetros Geotécnicos	49
3.4.1. Enrocamento	49
3.4.2. Areia	49
3.4.3. Argila	49
3.5. Definição das Variáveis Aleatórias	52

3.6. Análises Probabilísticas para a Situação após a Reconstrução	54
3.6.1. Aplicação do Método FOSM	54
3.6.2. Aplicação do Método de Estimativas Pontuais	64
3.6.3. Aplicação do Método de Monte Carlo	67
3.6.4. Comparação dos Resultados	69
 4 Conclusões e Recomendações de Trabalhos Futuros	 72
4.1. Conclusões	72
4.2. Recomendações de Trabalhos Futuros	74
 5 Referências bibliográficas	 75
 Anexo	 78
 Apêndice	 79

Lista de Figuras

Figura 1 – Comparação de duas curvas de distribuição de probabilidade (adaptado de Sayão et al, 2012)	18
Figura 2 – Exemplo de fatias no método de equilíbrio limite	21
Figura 3 – Forças atuantes numa fatia pelo método de Fellenius (1936)	21
Figura 4 – Forças atuantes numa fatia pelo método de Bishop Simplificado (1955)	22
Figura 5 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer (1967)	24
Figura 6 – Forças atuantes numa fatia genérica, pelo método de Morgenstern-Price (1965)	24
Figura 7 – Representação gráfica de uma distribuição normal (gaussiana) padrão	29
Figura 8 – Representação gráfica de uma distribuição lognormal	30
Figura 9 – Associação entre probabilidades de ruptura e suas consequências (Whitman, 1984)	38
Figura 10 – Relação entre índice de confiabilidade, fator de segurança e coeficiente de variação (Christian et al, 1992)	38
Figura 11 – Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (Dell’Avanzi e Sayão, 1998)	39
Figura 12 – Vista aérea da localização do quebra-mar do Terminal Portuário de Sergipe	43
Figura 13 – Vista aérea aproximada do quebra-mar após reconstrução	44
Figura 14 – Perfil geológico ao longo do eixo do quebra-mar (Brugger, 1996)	45
Figura 15 – Planta esquemática do reprojeto do quebra-mar	47
Figura 16 – Seção típica do reprojeto do quebra-mar	48

Figura 17 – Localização do furo QM 3 com os piezômetros	51
Figura 18 – Exemplo do cálculo do FS	55
Figura 19 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões totais	58
Figura 20 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$	59
Figura 21 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$	60
Figura 22 – Resultados da análise probabilística FOSM	62
Figura 23 – Influência dos parâmetros para análises em tensões totais	63
Figura 24 – Influência das variáveis aleatórias para análises em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$	63
Figura 25 – Influência das variáveis aleatórias para análises em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$	64
Figura 26 – Resultados da análise probabilística por Estimativas Pontuais	67
Figura 27 – Resultados da análise probabilística pela Simulação de Monte Carlo	69
Figura 28 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Totais	70
Figura 29 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=28,8^\circ$	71
Figura 30 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=8,5^\circ$	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estudos probabilísticos em geotecnia	42
Tabela 2 – Valores de resistência não drenada para as subcamadas de argila	50
Tabela 3 – Valores de ru por profundidade na camada de argila	52
Tabela 4 – Variáveis aleatórias para estudo em Tensões Totais	53
Tabela 5 – Variáveis aleatórias para estudo em Tensões Efetivas	54
Tabela 6 – Valores dos fatores de segurança (FS) das análises determinísticas	55
Tabela 7 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões totais	61
Tabela 8 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$	61
Tabela 9 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$	62
Tabela 10 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões totais	65
Tabela 11 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$	65
Tabela 12 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$	65
Tabela 13 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões totais	66
Tabela 14 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$	66
Tabela 15 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$	66
Tabela 16 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões totais	68

Tabela 17 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=28,8^\circ$ 68

Tabela 18 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=8,5^\circ$ 68

Lista de Símbolos

Letras Romanas Minúsculas

$f(x)$	função de probabilidade
f_0	fator de correção empírico para o método de Janbu Corrigido
n	número de valores da amostra
r_u	fator de poropressão
s_u	resistência não drenada
x	variável aleatória
\bar{x}	média de uma variável aleatória
z	profundidade

Letras Romanas Maiúsculas

CV	coeficiente de variação
E (FS)	valor médio do fator de segurança no método de Estimativas Pontuais
EP	método probabilístico de Estimativas Pontuais
FOSM	método probabilístico do Segundo Momento de Primeira Ordem
FS	fator de segurança
FS_{DET}	fator de segurança determinístico
\overline{FS}	fator de segurança médio, para cálculo do índice de confiabilidade
N	número de variáveis aleatórias
NA	nível d'água
P	probabilidade de ocorrência de um evento
PR	probabilidade de ruptura
R	esforço resistente
\bar{R}	média dos esforços resistentes
S	esforço solicitante

\bar{S}	média dos esforços solicitantes
V	variância
Z	variável aleatória padronizada

Letras Gregas

β	índice de confiabilidade
δFS	derivada parcial do fator de segurança
δx	derivada parcial de uma variável aleatória
Δu	acréscimo/excesso de poropressão
$\Delta \sigma_v$	acréscimo de tensão vertical total
Φ	função da distribuição normal padronizada
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
γ_{sat}	peso específico saturado
γ_{nat}	peso específico natural
σ	desvio-padrão
$\sigma [FS]$	desvio-padrão do fator de segurança
σ_R	desvio-padrão dos esforços resistentes
σ_S	desvio-padrão dos esforços solicitantes

1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A estabilidade de obras de engenharia costuma ser quantificada por fatores de segurança fornecidos por métodos determinísticos de cálculo, que consideram como conhecidos os carregamentos, parâmetros e propriedades dos materiais. Em geotecnia, a quantificação desses parâmetros inclui muitas incertezas pelo fato dos materiais envolvidos serem solos e rochas. Além disso, as hipóteses simplificadoras de cada método de cálculo e a geometria do problema também incluem incertezas.

A estimativa do fator de segurança por métodos determinísticos é feita com base em valores médios de parâmetros de solos e rochas. Contudo, os cálculos determinísticos desprezam as incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros dos materiais, podendo haver o risco de um insucesso na obra geotécnica devido a uma probabilidade de ruptura não calculada.

A fim de quantificar o risco de insucesso, é necessário realizar estudos de probabilidade e estatística. As análises probabilísticas dizem respeito a valores relativos de probabilidade de ruptura, visto que as fontes de incerteza são infinitas e apenas algumas delas podem ser consideradas nos cálculos. Apesar dos métodos probabilísticos não serem recentes, são ainda pouco utilizados na prática da engenharia.

É importante notar que um método determinístico que indica um fator de segurança $FS = 1,5$ pode representar um risco de ruptura maior do que um outro método que calcule um coeficiente de segurança $FS = 1,2$. Isso se justificaria pelo fato do primeiro valor embutir uma maior dispersão do fator de segurança médio do que o segundo, como indica a Figura 1.

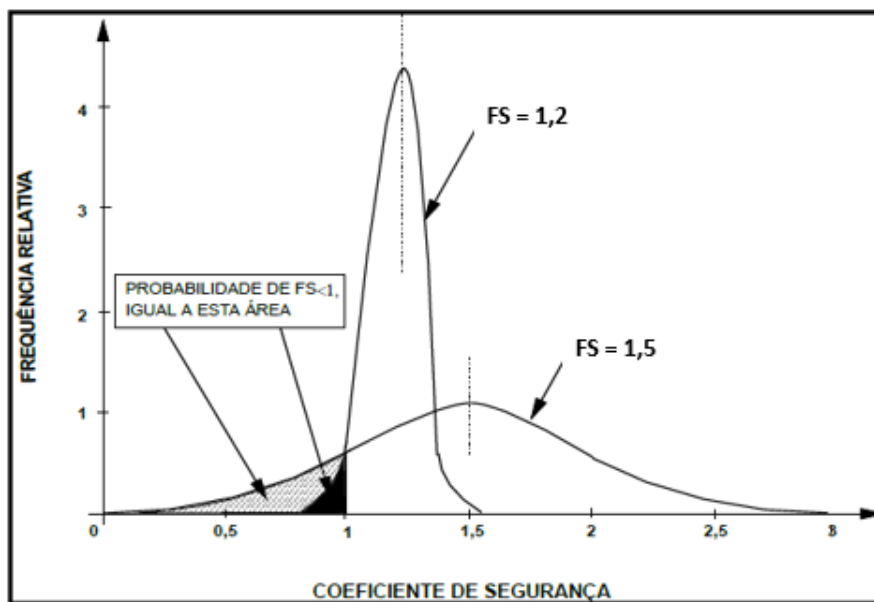


Figura 1 – Comparação de duas curvas de distribuição de probabilidade (adaptado de Sayão *et al*, 2012)

O método determinístico utiliza valores médios de parâmetros e expressa a segurança da obra por um valor de fator de segurança FS, enquanto que o método probabilístico utiliza como dados de entrada os valores médios e as incertezas associadas aos parâmetros, expressando a segurança por meio de uma probabilidade de ruptura PR.

Assim, uma análise determinística é insuficiente para aferir o nível real de segurança de um projeto geotécnico, tornando-se capital a consideração da variabilidade dos parâmetros, quantificada em análises estatísticas.

Outra vantagem dos estudos probabilísticos é permitir avaliar os parâmetros com maior influência na estabilidade em um determinado caso.

O conjunto da informação estatística aliada à experiência do engenheiro e um critério de valor admissível de risco de ruptura contribuem para a tomada de decisão que permita mais segurança e menores custos na fase de projeto.

Este trabalho apresenta como estudo de caso o Quebra-mar do Terminal Portuário de Sergipe, construído sobre argila mole, no município de Barra dos Coqueiros, SE. O quebra-mar sofreu uma ruptura em outubro de 1989, durante a construção, sendo reconstruído após o acidente.

1.2. Objetivos do Estudo

O trabalho em questão objetiva verificar e difundir os procedimentos dos métodos probabilísticos em análises de estabilidade em obras geotécnicas sobre solo mole. Como ferramenta para cálculos dos métodos de equilíbrio limite, utilizou-se o *software* Slide 7.0. São abordados três procedimentos probabilísticos: FOSM (Método do Segundo Momento de Primeira Ordem), Estimativas Pontuais e Simulação de Monte Carlo.

Os objetivos específicos são:

- Utilizar e comparar os resultados dos procedimentos probabilísticos, com métodos distintos de equilíbrio limite;
- Avaliar os parâmetros com maior influência nas análises de estabilidade;
- Comparar a aplicabilidade de análises em termos de tensões totais e tensões efetivas aos métodos probabilísticos.

1.3. Estrutura do Trabalho

A fim de se entender melhor os resultados e os objetivos propostos, este trabalho foi dividido da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta os conceitos dos métodos de equilíbrio limite, conceitos de estatística e probabilidade, e os procedimentos probabilísticos utilizados no trabalho;
- Capítulo 3: aborda o estudo de caso, com o histórico da obra e as análises probabilísticas realizadas, com a definição dos parâmetros de entrada dos materiais, as variáveis aleatórias a serem consideradas, e a seção geométrica de estudo;
- Capítulo 4: discutem-se as principais conclusões dos estudos, com comentários sobre os resultados e sugestões de temas a serem abordados em estudos futuros sobre o assunto.

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Estabilidade de Taludes

A análise da estabilidade de um talude pode ser feita pelas seguintes metodologias:

- Métodos Analíticos: baseiam-se na teoria do equilíbrio limite, na qual a estabilidade é expressa ou por um fator de segurança (FS), ou por uma probabilidade de ruptura (PR). Neste grupo incluem-se também modelos numéricos baseados na relação tensão-deformação;
- Métodos Experimentais: são testados modelos físicos em escala reduzida;
- Métodos Observacionais: têm como base a experiência de obras anteriores e a retroanálise de uma ruptura prévia.

Em estudos de estabilidade de taludes, são usuais os métodos analíticos de equilíbrio limite, que consistem na comparação de forças ou momentos que tendem a produzir e evitar o deslizamento, ou seja, o valor de FS é definido pela razão entre os esforços resistentes (R) e solicitantes (S), tal como indica a Equação 1:

$$FS = \frac{R}{S} \quad [1]$$

Caso as forças ou momentos resistentes e solicitantes se equilibrem, o fator de segurança é igual a 1, e o talude está na iminência de romper, porém em condição limite de equilíbrio, considerada ainda estável.

Os métodos de equilíbrio limite classificam-se em: métodos das cunhas e métodos das fatias. Nestes, a massa de solo acima da superfície potencial de ruptura é dividida em fatias (Figura 2), sendo cada uma então avaliada por um sistema de forças nela atuantes. Na Figura 2 O é o centro, R é o raio da superfície de ruptura circular; i representa a fatia genérica da massa instável e X_i a distância horizontal entre o centro de gravidade da fatia e o ponto O.

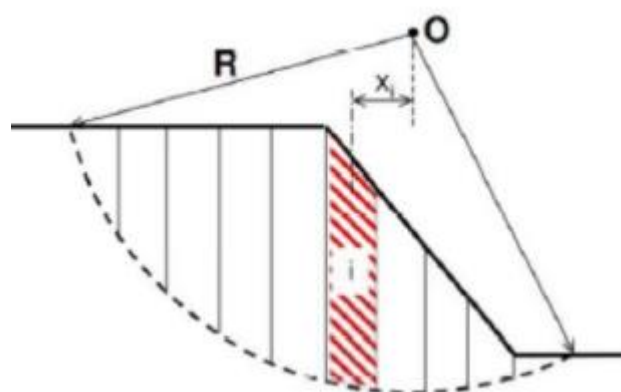


Figura 2 – Exemplo de fatias no método de equilíbrio limite

2.1.1. Métodos de Equilíbrio Limite

Nestes métodos, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb é normalmente adotado para o cálculo do valor de FS. São vários os métodos de equilíbrio limite disponíveis para estudos de estabilidade, mas serão aqui apresentados apenas os mais conhecidos.

Método de Fellenius (1936) ou Método Sueco

A superfície de ruptura é circular e são consideradas apenas duas equações de equilíbrio (uma de forças e outra de momentos); as forças entre fatias adjacentes são desprezadas no cálculo do fator de segurança (Figura 3).

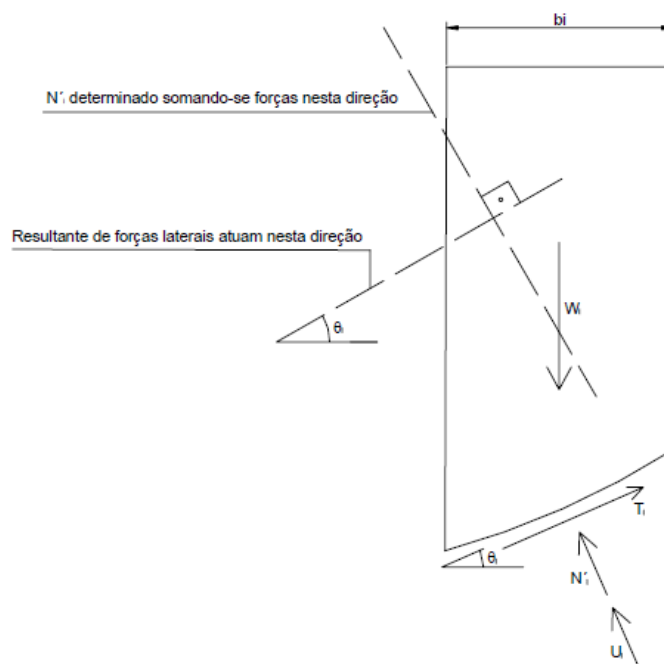


Figura 3 – Forças atuantes numa fatia pelo método de Fellenius (1936)

Na Figura 2.2, considera-se:

W_i = força peso da fatia;

b_i = largura da fatia;

θ_i = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal;

N_i = força normal à base da fatia;

U_i = força de poropressão na base da fatia;

T_i = força cisalhante na base da fatia.

Ao aplicar o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo de ruptura (O) e o equilíbrio das forças na direção normal à base da fatia, obtém-se a Equação 2:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[c' \left(\frac{b_i}{\cos \theta_i} \right) + \left(W_i \cdot \cos \theta_i - u_i \left(\frac{b_i}{\cos \theta_i} \right) \right) \tan \phi' \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \theta_i} \quad [2]$$

- Método Simplificado de Bishop (1955)

A superfície de ruptura é circular e a resultante das forças entre fatias adjacentes é considerada horizontal. O fator de segurança é dado pelas equações de equilíbrio de forças verticais e de momentos. A Figura 4 mostra os elementos da fatia genérica:

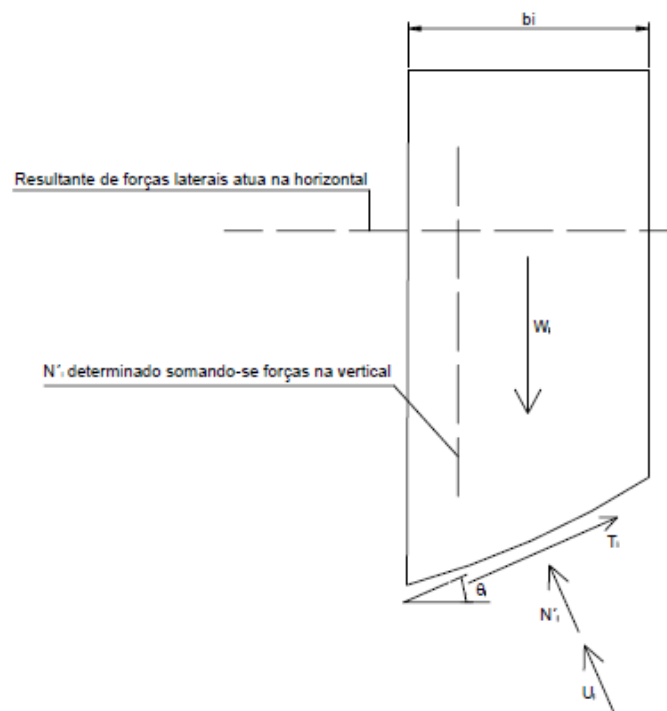


Figura 4 – Forças atuantes numa fatia pelo método de Bishop Simplificado (1955)

O fator de segurança neste método é então calculado pela Equação 3:

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \theta_i} \sum_{i=1}^n \frac{[c' \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \operatorname{tg} \Phi']}{M_i(\theta)}$$

onde:

[3]

$$M_i(\theta) = \cos \theta_i \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \theta_i \cdot \operatorname{tg} \Phi'}{FS_i} \right]$$

Métodos Simplificado de Janbu (1956) e Corrigido (Janbu, 1973)

A superfície de ruptura pode ser de qualquer formato e o método baseia-se no equilíbrio de forças e momentos. As forças verticais tangenciais (cisalhantes) entre fatias adjacentes são desprezadas no cálculo. O método de Janbu Simplificado utiliza as equações de forças em sua formulação. Anos depois, Janbu propôs um fator de correção empírico f_0 , para satisfazer a equação de momentos, sendo FS obtido pela Equação 4:

$$FS = \frac{f_0}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \operatorname{tg} \theta_i} \sum_{i=1}^n \frac{[c' \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \operatorname{tg} \Phi']}{\cos \theta_i \cdot M_i(\theta)}$$

$$M_i(\theta) = \cos \theta_i \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \theta_i \cdot \operatorname{tg} \Phi'}{FS_i} \right]$$

[4]

Método de Spencer (1967)

Originalmente, era um método desenvolvido para superfícies de ruptura circulares, sendo depois, em 1973, adaptado para superfícies poligonais. É considerado um método rigoroso, pois soluciona um sistema com todas as equações de equilíbrio e o valor de FS calculado é tido como exato. Admite-se que a resultante das forças entre fatias adjacentes (Q_i) tem uma inclinação constante ao longo da superfície de ruptura, devendo passar pelo ponto de intercessão entre as forças W_i , T_i e N_i . As forças atuantes na fatia são apresentadas na Figura 5. O fator de segurança é obtido quando o equilíbrio de momentos se iguala ao equilíbrio de forças.

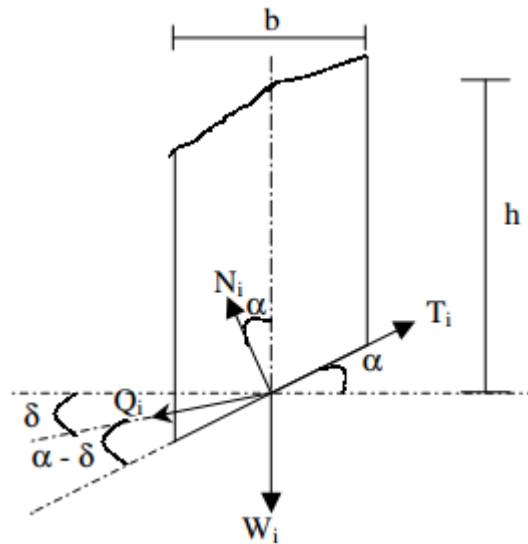


Figura 5 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer (1967)

Método de Morgenstern-Price (1965)

É um método rigoroso aplicado para superfícies de ruptura poligonais de formato qualquer. A resultante de força entre fatias adjacentes possui direção determinada por uma função a ser arbitrada. É considerado um método rigoroso, pois satisfaz as condições de estabilidade com todas as equações de equilíbrio de forças e momentos. O resultado do fator de segurança encontrado é mais preciso, porém o cálculo envolve um processo iterativos e as fatias são infinitesimais, sendo necessário o uso de ferramenta computacional. As forças atuantes entre fatias adjacentes estão apresentadas na Figura 6.

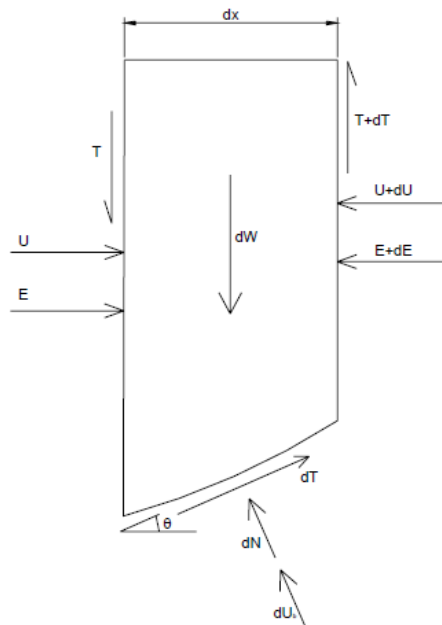


Figura 6 – Forças atuantes numa fatia genérica, pelo método de Morgenstern-Price (1965)

onde:

U = resultante da poropressão na face lateral da fatia;

dU_b = resultante da poropressão na base da fatia;

dW = força peso da fatia;

T = força tangencial entre fatias adjacentes;

E = força normal entre fatias adjacentes;

dN = força normal na base da fatia;

dT = força cisalhante mobilizada na base da fatia.

Neste trabalho serão adotados os métodos determinísticos de Janbu Simplificado (1956), Janbu Corrigido (1973), Spencer (1967) e Morgenster-Price (1965), todos disponíveis na ferramenta de cálculo Slide 7.0.

2.1.2.

Abordagem Determinística x Abordagem Probabilística

A análise determinística da segurança de um talude é quantitativa, pois resulta em um valor de FS, definido anteriormente na Equação 1.

Os esforços solicitantes podem ser força, momento, ou tensão cisalhante. Essas solicitações, por sua vez, são obtidas por parâmetros determinados em ensaios de campo e/ou laboratório. Em geral, estima-se para cada parâmetro um valor médio dos resultados dos ensaios, considerado como constante na análise, desprezando a variabilidade natural das características do material, o que caracteriza a análise como determinística. Uma estimativa incorreta de um parâmetro do material pode levar a cálculos irreais do fator de segurança e a eventual ruptura do talude.

Ao se variar um certo parâmetro para verificar sua influência no valor de FS, o estudo torna-se uma análise de sensibilidade, ou análise paramétrica. Numa abordagem probabilística, considera-se também a frequência de ocorrência das informações disponíveis.

Assim como na abordagem determinística, a avaliação probabilística da estabilidade de taludes, utiliza um método de equilíbrio limite, incorporando, contudo, na análise a variação dos parâmetros de projeto (dados disponíveis). Os parâmetros de projeto são os dados de entrada no estudo, e funcionam como variáveis aleatórias no âmbito probabilístico. A fim de se avaliar a variabilidade dos dados de entrada, é essencial desenvolver um estudo estatístico.

Em projetos geotécnicos, avalia-se o terreno de implantação da obra, ou seja, os materiais objetos do estudo são solos e rochas, os quais podem variar no espaço e no tempo. Torna-se portanto pertinente que as obras geotécnicas sejam tratadas com a quantificação do risco de ruptura, o qual é associado à probabilidade de ocorrência e suas consequências. Assim, o engenheiro obtém um embasamento mais adequado para suas decisões.

Dessa forma, a abordagem probabilística complementa a determinística, pois se obtém uma distribuição de valores que exprime, por exemplo, a probabilidade de ruptura de um talude para quando tiver FS menor que 1.

2.2.

Conceitos Fundamentais da Estatística e Probabilidade

Diversas são as fontes de incerteza de um parâmetro geotécnico:

- As condições do material em campo são difíceis de reproduzir em laboratório;
- Ocorre amolgamento do solo ao se instalar um equipamento;
- Não observância de alguma característica relevante do subsolo em furos de sondagem pontuais;
- Variabilidade inerente do substrato natural.

Para o uso de métodos probabilísticos em estudos geotécnicos, é necessário conhecer os conceitos básicos de estatística e probabilidade.

2.2.1.

Estatística

Diz respeito a avaliar um conjunto de dados amostrais. Amostra consiste em uma parte representativa de uma população de interesse, e população é o total de valores considerados. Portanto, como é impossível se obter todos os valores de uma população de interesse, a coleta de amostra é capital para estudos estatísticos.

As principais características da amostra coletada são apresentadas por medidas de tendência central e de variação. As medidas de tendência central são: média aritmética, mediana e moda, enquanto que as medidas de variação são: variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

Neste trabalho, a mediana e a moda não são aplicadas, sendo aqui definidas apenas as demais medidas, para fins de conhecimento estatístico básico.

Média Aritmética

A média aritmética é a soma de todos os valores observados na amostra dividido pelo número de valores coletados. Portanto, dada uma variável aleatória com uma amostra com n valores, a média aritmética é calculada pela Equação 5:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [5]$$

Como já mencionado, a média de uma variável aleatória corresponde ao valor do parâmetro usualmente adotado em estudos determinísticos.

Variância, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação

As medidas de variância, desvio padrão e coeficiente de variação são responsáveis pela quantificação da dispersão dos dados em relação à média aritmética.

A variância é a média do quadrado das diferenças entre o valor observado e média aritmética. Seu cálculo é dado pela Equação 6.

$$V = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad [6]$$

O desvio padrão, definido na Equação 7, corresponde à raiz quadrada da variância:

$$\sigma = \sqrt{V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [7]$$

Ao definir o valor de uma variável aleatória, a mesma é dada pela média aritmética do conjunto de valores coletados (amostra), com uma dispersão para mais ou para menos e cujo valor é o desvio padrão. Sendo assim, uma variável aleatória é definida como: $\bar{x} \pm \sigma$.

O coeficiente de variação é a porcentagem do desvio padrão sobre a média aritmética, conforme indica a Equação 8:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 (\%) \quad [8]$$

2.2.2. Probabilidade

Probabilidade é a possibilidade de um evento acontecer dentro de certos eventos alternativos (Ang e Tang, 1975).

Todos os resultados possíveis de uma experiência aleatória formam diferentes amostras, e o conjunto dessas amostras formam uma população. Dentro de uma amostra, qualquer subconjunto desses resultados é considerado um evento. Com essas definições torna-se intuitiva a definição de probabilidade com a Equação 9:

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(S)} \quad [9]$$

Onde:

$P(A)$: probabilidade do evento A ocorrer;

$n(A)$: número de elementos do evento A ;

$n(S)$: número de elementos do espaço amostral.

Função de Probabilidade

A função de probabilidade descreve a forma (distribuição) da curva de probabilidade. Essa função relaciona a variável aleatória com sua probabilidade de ocorrência, conforme expressão:

$$P[a \leq x \leq b] = \int_a^b f(x) \cdot dx \quad [10]$$

Para uma variável aleatória x , com possíveis valores dentro de um intervalo $[a, b]$, a probabilidade P é dada por uma função de probabilidade, $f(x)$.

Há várias formas de distribuição, sendo mais usadas em estudos geotécnicos e abordadas neste trabalho as distribuições normal e lognormal.

Distribuição Normal

Também conhecida como distribuição de Gauss, é a mais difundida e utilizada. É caracterizada por sua simetria, sendo descrita pela função de probabilidade na Equação 11:

$$f(x, \bar{x}, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-0,5\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad [11]$$

onde:

σ : desvio padrão;

x : valor da variável aleatória contínua;

\bar{x} : média da distribuição.

A Figura 7 apresenta a forma gráfica da distribuição normal padrão, com média zero e o desvio padrão igual a 1,0.

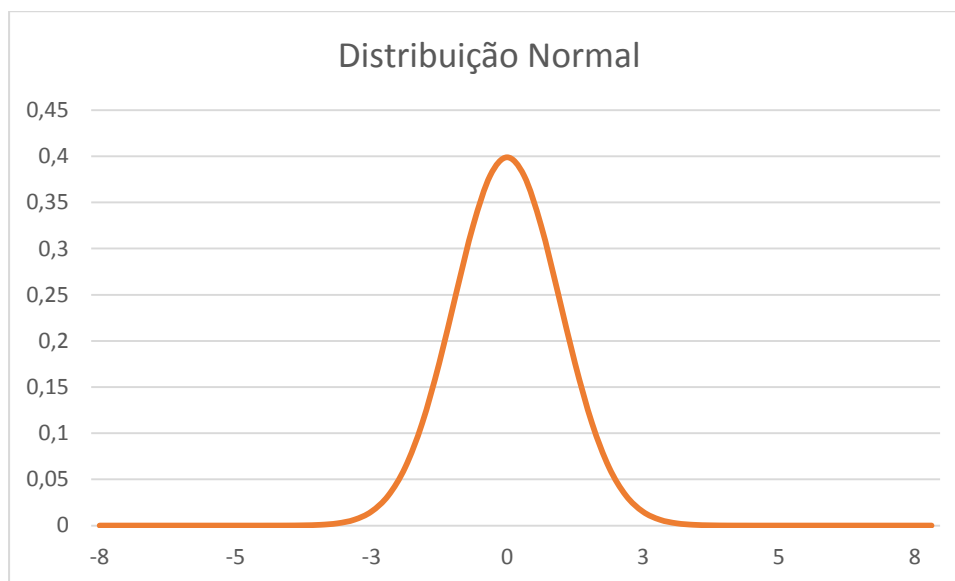


Figura 7 – Representação gráfica de uma distribuição normal (gaussiana) padrão

As probabilidades são portanto obtidas a partir da integração numérica dessa curva padronizada, cujos resultados são apresentados em forma de tabela padronizada (Anexo A). Ao substituir esses valores de $\bar{x} = 0$ e $\sigma = 1$ na Equação 11, obtém-se uma distribuição reduzida (Equação 12):

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-Z^2/2} \quad [12]$$

onde:

Z : é uma variável aleatória padronizada, dada por:

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad [13]$$

Distribuição Lognormal

Nessa distribuição, o logaritmo da função de probabilidade tem distribuição normal (Equação 14):

$$f(x, \bar{x}, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(x) - \bar{x}]^2} \quad [14]$$

Esta distribuição é utilizada quando a variável apresenta assimetria à esquerda ou para variáveis cujos valores são maiores que zero. A Figura 8 exibe uma representação gráfica da distribuição lognormal. A média e o desvio padrão dessa distribuição são calculados respectivamente pelas Equações 15 e 16:

$$\bar{x} = \ln(x) - 0,5 \left[\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma}{x} \right)^2 \right) \right] \quad [15]$$

$$\sigma = \sqrt{\left[\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma}{x} \right)^2 \right) \right]} \quad [16]$$

No âmbito geotécnico, os seguintes parâmetros podem aproximar-se tanto da distribuição normal quanto da lognormal: ângulo de atrito, massa específica (seca e úmida), índice de vazios, teor de umidade e grau de saturação (Silva, 2015).

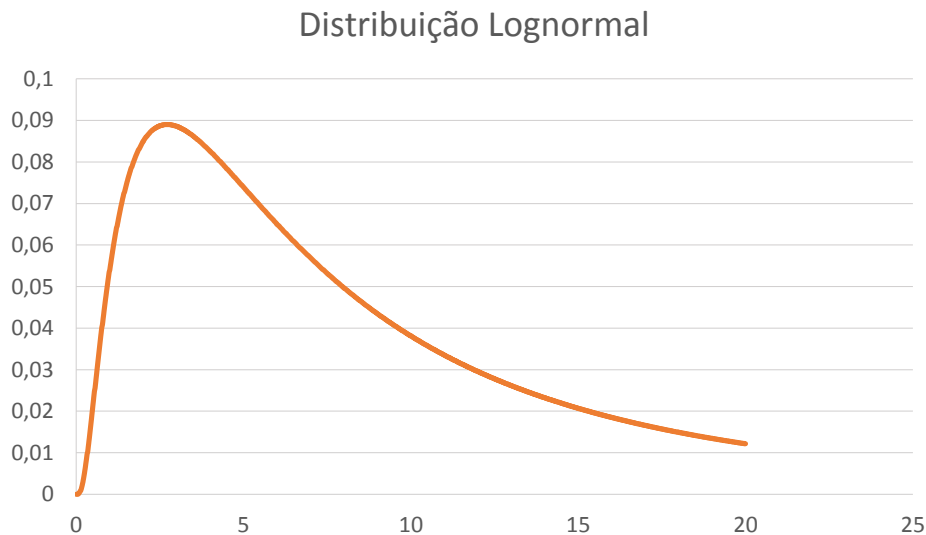


Figura 8 – Representação gráfica de uma distribuição lognormal

2.3. Métodos Probabilísticos para Aplicação Geotécnica

No cenário geotécnico, são diversas as incertezas inerentes aos dados de entrada ao avaliar um problema: propriedades de solos e rochas, agentes externos, nível d'água e geometria adotada.

Desta forma, o estudo probabilístico complementa o fator de segurança dos estudos determinísticos, pois quantifica algumas das incertezas a partir de um índice de confiabilidade (β), o qual pode ser associado ao valor da probabilidade de ruptura (PR).

Nos métodos probabilísticos, avalia-se a distribuição de probabilidade de uma variável aleatória dependente, a qual é gerada por distribuições estatísticas de variáveis aleatórias independentes. No âmbito geotécnico, considera-se como variáveis independentes os dados de entrada de um problema como coesão, ângulo de atrito, peso específico, poropressão e nível d'água, e a variável aleatória dependente é o fator de segurança resultante das análises.

Utilizam-se na prática geotécnica os três métodos probabilísticos, descritos a seguir. Os métodos do Segundo Momento (ou FOSM, *First Order of Second Moment*) e das Estimativas Pontuais (ou Rosenblueth) admitem uma distribuição probabilística para o fator de segurança (variável dependente), cuja média e desvio padrão são obtidos por meio das médias e desvios padrão das propriedades e os parâmetros geotécnicos (variáveis independentes). Por outro lado, a distribuição do fator de segurança na Simulação de Monte Carlo é obtida a partir de um determinado número de valores gerados para as propriedades e parâmetros geotécnicos.

2.3.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM)

Este método é considerado simples e consiste em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor, para obter o segundo momento. Logo, avaliam-se apenas os dois primeiros momentos, enquanto os demais são desprezados. Designa-se essa aproximação por segundo momento de primeira ordem.

No meio geotécnico internacional, o método foi sugerido por Christian *et al.* (1992). No Brasil, sua aplicação em um talude de grande altura foi logo reportada

por Sandroni e Sayão (1992). Varia-se um parâmetro de cada vez e verifica-se a influência de cada um sobre a variância do fator de segurança.

Na estatística, média e variância são, respectivamente, o primeiro e o segundo momento que definem uma variável aleatória. Portanto, pode-se definir uma função que calcula sucessivamente as derivadas de uma variável aleatória; essas derivadas definem seus momentos. Essas funções podem ser chamadas de funções geradoras de momentos ou funções de desempenho.

As funções de séries de potência permitem o cálculo de integrais e equações diferenciais, realizando uma soma de termos infinitos. No método FOSM, aplica-se a expansão da série de Taylor como uma função de desempenho (ou geradora de momentos).

Em geotecnia, deseja-se obter o fator de segurança (FS), função de desempenho, a partir das propriedades e parâmetros geotécnicos, e da geometria do problema (variáveis aleatórias, x). A função de desempenho sob a forma da série de Taylor em torno do valor médio (\bar{x}) é dada na Equação 17:

$$FS(x) = FS(\bar{x}) + \frac{FS'(\bar{x})}{1!}(x - \bar{x}) + \frac{FS''(\bar{x})}{2!}(x - \bar{x})^2 + \dots \quad [17]$$

onde $FS'(\bar{x})$ e $FS''(\bar{x})$ são a primeira e a segunda derivadas, respectivamente.

A partir do terceiro termo, os valores das derivadas são desprezíveis em relação aos primeiros. Logo, trunca-se a série na derivada de primeira ordem, ou seja, no segundo momento da série:

$$FS(x) = FS(\bar{x}) + FS'(\bar{x})(x - \bar{x}) \quad [18 a]$$

$$FS(x) - FS(\bar{x}) = FS'(\bar{x})(x - \bar{x}) \quad [18 b]$$

O lado esquerdo da Equação 18 indica o desvio, em relação ao valor médio \bar{x} , do valor da função em x . Ao elevar ao quadrado ambos os lados da equação, obtém-se aproximadamente a variância do fator de segurança, expressa pela Equação 19:

$$V[FS(x)] = (FS'(\bar{x}))^2 \cdot V(x) \quad [19]$$

A Equação 19 diz respeito ao fator de segurança depender de uma única variável independente. Como os problemas de engenharia envolvem diversas variáveis, utiliza-se a Equação 20 para obter a variância do FS, que é calculada por

um somatório dos produtos entre o quadrado das derivadas parciais do FS em relação a cada parâmetro variável, e as respectivas variâncias de cada parâmetro:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right]^2 \cdot V[x_i] \quad [20]$$

Portanto, este método fornece aproximações para média e desvio padrão de um parâmetro de interesse (no caso, o FS), como função da média e desvio padrão dos parâmetros de entrada (x_i , variáveis independentes). Como vantagens, nota-se que os cálculos são simples e que não é necessário o conhecimento das funções de distribuições de probabilidade dos parâmetros de entrada. Além disso, pode-se verificar a influência de cada variável aleatória na variância no fator de segurança, ou seja, na estabilidade do caso em questão.

Com o valor de FS de um cálculo determinístico, a variância do FS (calculada com a Equação 20), e a distribuição de probabilidade adotada (por exemplo, normal ou lognormal), pode-se estimar a probabilidade de haver ruptura, ou seja do valor de FS estar abaixo de 1,0.

Pela Equação 20, observa-se que o método demanda o conhecimento das derivadas parciais do FS. A fim de solucionar a dificuldade de obter essas derivadas parciais, Sandroni e Sayão (1992) recomendam variar um parâmetro de cada vez, mantendo fixos os demais. Desta forma, obtém-se um FS diferente para cada variação de parâmetro, e a derivada parcial de FS é calculada por diferenças divididas, como indica a Equação 21:

$$\frac{\partial FS}{\partial x_i} = \frac{FS(x_i + \partial x_i) - FS(\bar{x}_i)}{\partial x_i} \quad [21]$$

Dell'Avanzi e Sayão (1998) recomendam usar uma variação de 10% sobre o valor médio de cada parâmetro na aproximação dessas derivadas parciais, após verificarem que ocorre uma constância de resultados para variações de até 15%, no caso de taludes de grande altura. Para outras situações geotécnicas, é necessária uma avaliação prévia do valor adequado a ser usado na variação sobre o valor médio de cada parâmetro, para o cálculo da variância do FS, com base na Equação 20.

2.3.2.

Método das Estimativas Pontuais (ou Rosenblueth) - EP

Este método estima os dois primeiros momentos da função de desempenho para um fator de segurança, FS. Essa função é obtida a partir de 2^n análises de equilíbrio limite (determinísticas), onde n é número de parâmetros (variáveis independentes). Realizam-se todas as combinações possíveis dos valores de parâmetros, acrescidos ou reduzidos de seus desvios padrão.

Rosenblueth (1975) demonstrou que, para uma função de desempenho de um fator de segurança, por exemplo, dependente de duas variáveis ($n = 2$), o valor médio dessa função ($E(FS)$) é dado por:

$$E(FS) = p_{++} \cdot FS_{++} + p_{+-} \cdot FS_{+-} + p_{-+} \cdot FS_{-+} + p_{--} \cdot FS_{--} \quad [22]$$

Onde:

p_{++} é a probabilidade de que os valores das duas variáveis sejam acrescidas de seus desvios padrão;

p_{+-} e p_{-+} são as probabilidades de que uma variável seja acrescida e a outra subtraída de seus respectivos desvios padrão;

p_{--} é a probabilidade de que os valores das duas variáveis sejam subtraídos de seus desvios padrão;

FS_{++} é o valor do fator de segurança resultante da combinação de que as duas variáveis sejam acrescidas de seus desvios padrão;

FS_{+-} e FS_{-+} são os valores dos fatores de segurança resultantes da combinação de que uma variável seja acrescida e a outra subtraída de seus respectivos desvios padrão;

FS_{--} é o valor do fator de segurança resultante da combinação de que as duas variáveis sejam subtraídas de seus desvios padrão.

A variância do fator de segurança é calculada pela Equação 23 e o desvio padrão pela Equação 24:

$$V[FS] = p_{++} \cdot FS_{++}^2 + p_{+-} \cdot FS_{+-}^2 + p_{-+} \cdot FS_{-+}^2 + p_{--} \cdot FS_{--}^2 - [E(FS)]^2 \quad [23]$$

$$\sigma[FS] = \sqrt{V[FS]} \quad [24]$$

Tratando-se de variáveis independentes com distribuição simétrica, as probabilidades $p_{++}, p_{+-}, p_{-+}, p_{--}$ são todas iguais a 25% (1/4), para 2 variáveis

aleatórias independentes. Portanto, o valor estimado de FS ($E(FS)$) é uma média aritmética de todos os fatores de segurança calculados. Já a variância é o somatório de todos os fatores de segurança ao quadrado, subtraído do fator de segurança médio ($E(FS)$).

Assim como para o método de FOSM, a probabilidade da função de desempenho estar dentro de um certo intervalo, ou seja, a probabilidade de FS ser menor que 1,0 é também calculada pela distribuição de probabilidade adotada, e os valores de média, variância e desvio padrão, neste caso obtidos pelas Equações 22, 23 e 34, respectivamente.

2.3.3. Simulação de Monte Carlo

Este método gera aleatoriamente um número N de valores para cada parâmetro (variável aleatória independente). A partir de cada combinação de valores escolhidos aleatoriamente, são realizadas análises determinísticas. Os resultados obtidos, fatores de segurança, formam um conjunto denominado de amostra de uma população. Com essa amostra, obtém-se uma função de densidade de probabilidade do fator de segurança. A média e o desvio padrão dessa amostra são calculados pelas Equações 5 e 7, respectivamente.

A geração aleatória dos valores das variáveis aleatórias independentes é comumente realizada com programas cujos dados de entrada são as médias, desvios padrão e o tipo de distribuição das variáveis.

O valor da probabilidade de ruptura (PR) é calculado a partir da distribuição do fator de segurança, ou pela razão entre o número de análises nos quais os valores de FS são menores que 1,0 e o número total de análises simuladas.

Como a Simulação de Monte Carlo é uma metodologia que define uma amostra, seus resultados estão sujeitos a erros, os quais são reduzidos conforme se aumenta o número de elementos dessa amostra. Portanto, a solução é mais exata quando N tende a infinito, o que demanda um número grande de análises determinísticas, se comparado aos outros métodos, apresentados anteriormente.

2.4. Confiabilidade e Risco de Ruptura

A diferença entre os esforços resistentes (R) e os esforços solicitantes (S) definem se o estado de uma análise de equilíbrio limite é de sucesso ou insucesso. Quando $R - S > 0$, caracteriza-se uma região estável, e quando $R - S < 0$, uma região é instável. Se $R - S = 0$, significa que as duas regiões se interceptam, definindo uma superfície limite de estado.

Estabelecer distribuições para essa diferença entre capacidade de resistência e demanda de solicitação envolve dificuldades. Para simplificar a resolução do problema, define-se um índice de confiabilidade β , que implicitamente leva em consideração o desempenho dessa diferença. Sendo assim, não é necessário conhecer o comportamento global da distribuição de $R - S$ para estimar a segurança.

Segundo Ribeiro (2008), obteve-se as primeiras medições de confiabilidade por meio da definição proposta pela Equação 25:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\sigma} \quad [25]$$

Onde \bar{x} é o valor médio e σ é o desvio padrão de uma distribuição de probabilidade. Este β baseia-se na probabilidade da ruptura ocorrer caso $R - S$ seja menor ou igual a zero.

Com base na Equação 25, β é definido pelas Equações 26 e 27.

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sigma[R - S]} \quad [26]$$

$$\sigma[R - S] = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad [27]$$

onde:

\bar{R} = valor médio dos esforços resistentes;

\bar{S} = valor médio dos esforços solicitantes;

$\sigma[R - S]$ = desvio padrão da diferença entre $R - S$;

σ_R = desvio padrão dos esforços resistentes;

σ_S = desvio padrão dos esforços solicitantes.

Morlá Catalán e Cornell (1976) consideram uma distribuição normal para o índice de confiabilidade, cujo desenvolvimento algébrico é descrito pelas Equações 28a a 28d.

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sigma_R} \quad [28a]$$

$$\beta = \frac{\frac{\bar{R}}{\bar{S}} - 1}{\sigma_R / \bar{S}} \quad [28b]$$

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1}{\sigma[FS]} \quad [28c]$$

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1}{FS \times CV} \quad [28d]$$

Onde \overline{FS} é o fator de segurança médio e $\sigma[FS]$ é o desvio padrão do fator de segurança. Nota-se que o desvio padrão de FS é igual à razão entre o desvio padrão dos esforços resistentes e o valor médio dos esforços solicitantes. Pode-se dizer que a segurança é quantificada tendo como base o $FS = 1,0$, o qual caracteriza a ruptura em análise de estabilidade.

Em estudos de estabilidade geotécnica, diversos autores utilizam índices de confiabilidade definidos pela Equação 28c (Christian *et al*, 1992; Sandroni e Sayão, 1992).

A importância de um projeto/obra deve ser considerada ao se admitir um valor de probabilidade de insucesso. Como exemplo, o talude de uma grande barragem deve ter uma menor probabilidade de ruptura do que os taludes da estrada de acesso à obra, a qual é provisória.

A Figura 9, apresentada por Whitman (1984), na 17ª Palestra Terzaghi da ASCE, define o nível de risco praticado em projetos usuais de engenharia geotécnica, relacionando a probabilidade de ruptura com as consequências de um acidente, representadas pelos custos associados à perda de vidas humanas.

A Figura 10 ilustra a relação entre índice de confiabilidade β , fator de segurança FS, e coeficiente de variação CV, a qual representa a Equação 28d. Nota-se que, para um mesmo fator de segurança, quanto menor for o coeficiente CV,

maior é a confiabilidade β . Por outro lado, para projetos com um mesmo índice β , quanto maior for CV, maior é o valor de FS.

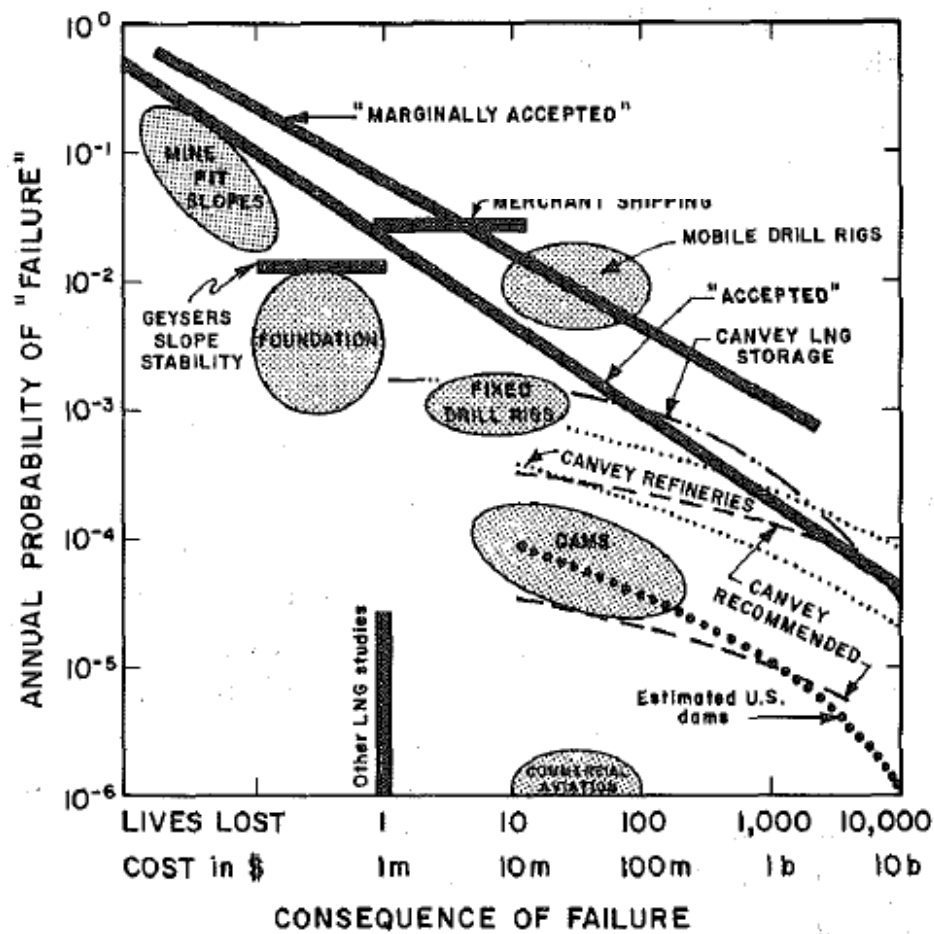


Figura 9 – Associação entre probabilidades de ruptura e suas consequências (Whitman, 1984)

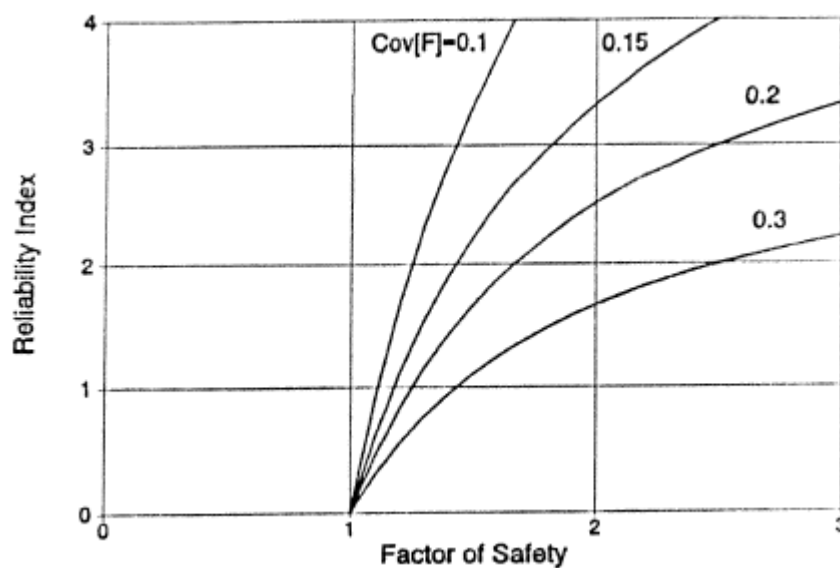


Figura 10 – Relação entre índice de confiabilidade, fator de segurança e coeficiente de variação (Christian *et al*, 1992)

O índice β pode ser relacionado a um valor de PR por meio do ábaco apresentado por Dell'Avanzi e Sayão (1998), que fornece essa relação para distribuições normal e lognormais e para diferentes valores de CV do FS (Figura 11). Ao analisar este ábaco, pode-se concluir que:

- Para um mesmo valor de índice $\beta > 1,0$, a distribuição normal fornece valores de PR maiores que a distribuição lognormal, sendo, portanto, a favor da segurança;
- Para $\beta < 1,0$, o valor de PR independe do tipo de distribuição;
- Para distribuições lognormais, um valor de FS com maior CV é associado a uma menor confiabilidade β , e, portanto, um maior valor de PR, sendo, assim, a favor da segurança.

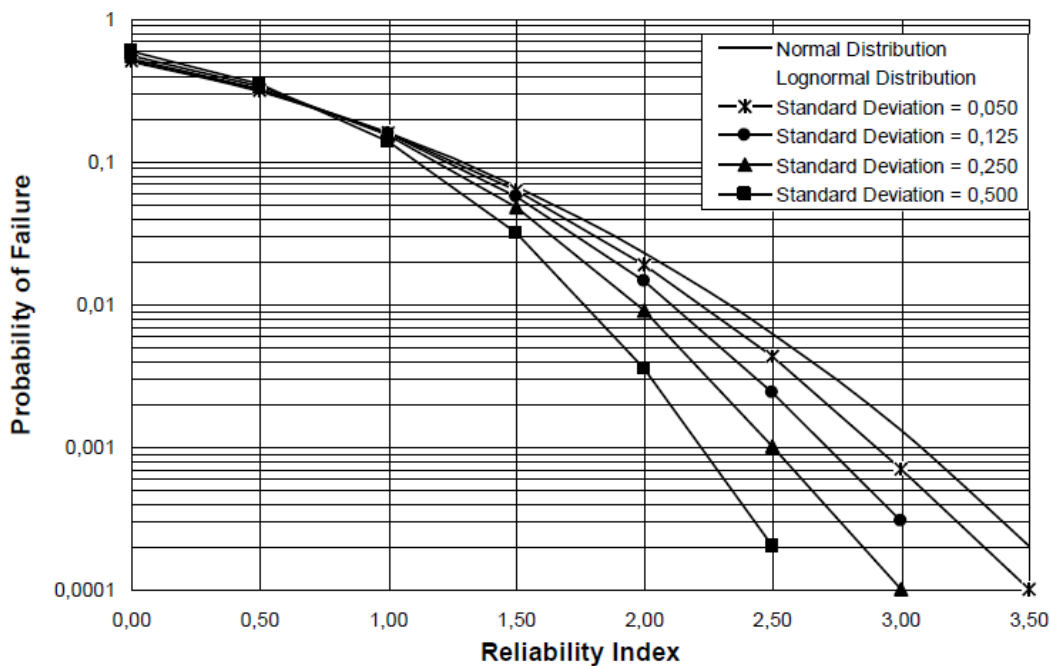


Figura 11 – Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (Dell'Avanzi e Sayão, 1998)

2.5. Trabalhos Anteriores

Ribeiro (2008) apresenta estudos probabilísticos nos seguintes campos da Geotecnia: previsões de recalque, ruptura de fundações superficiais e profundas, deslizamento de muro de arrimo e de ruptura de um talude de barragem. O estudo sobre a estabilidade do talude da Barragem de Benguê, construída em 2000 no

Ceará, mostrou que os métodos de Bishop e Morgenstern e Price chegaram a valores menores de PR, comparando-se com os de Fellenius e Janbu. Além disso, o método FOSM apresentou PR maior do que o de Estimativas Pontuais. Neste estudo, a coesão efetiva foi a variável de maior influência no cálculo da variância do FS.

Fabício (2006) estudou o talude da Barragem de Curuá-Una, no Pará, e da mesma forma que Ribeiro (2008), reportou valores de PR maiores com o método FOSM do que com o método EP. Além disso, concluiu que para superfícies de ruptura fixas, PR foi maior do que para superfícies de ruptura livres. Por outro lado, neste estudo, o ângulo de atrito efetivo teve maior influência no cálculo da variância do FS.

Dell'Avanzi (1995) analisou a Barragem de Santa Branca, em São Paulo, pelo método FOSM, e observou que os métodos de equilíbrio limite rigorosos - Spencer e Sarma - obtiveram PR menores do que os métodos simplificados de Janbu e Bishop. Araújo (2018) complementou o estudo de Santa Branca ao comparar o método FOSM com outros métodos probabilísticos, com base no método de equilíbrio limite de Spencer. Assim como Ribeiro (2008), Araújo (2018) concluiu que PR é maior no método FOSM do que no método de EP; por outro lado, PR na Simulação de Monte Carlo foi também maior do que no método EP. Neste estudo de caso, tanto Ribeiro (2008) quanto Araújo (2018) concluíram que a coesão efetiva também foi o parâmetro de maior influência na variância do fator de segurança no método FOSM, corroborando os resultados de Ribeiro (2008).

Silva (2015) concluiu em seu estudo sobre um talude da Mina de Alegria que a PR é maior pelo método FOSM do que por EP e de Monte Carlo; entretanto, os três métodos probabilísticos chegaram a resultados de PR bem próximos.

Outro estudo da estabilidade em talude de mineração foi apresentado por Guedes (1997), sobre a Mina do Cauê (MG). Da mesma forma que Silva (2015), Guedes chegou a valores de PR muito próximos para os métodos FOSM, EP e Monte Carlo, com PR por FOSM sendo maior. Além disso, Guedes (1997) concluiu que, para taludes com até 100 m de altura, a coesão efetiva foi o parâmetro de maior influência no valor de $V[FS]$, enquanto que nos taludes com altura acima de 100 m, o ângulo de atrito efetivo foi o parâmetro de maior influência.

Vecci (2018) também estudou o talude da Mina do Cauê, com 200 m de altura, identificando que o ângulo de atrito efetivo foi o parâmetro de maior influência na segurança, corroborando o estudo de Guedes (1997). As maiores PR

foram obtidas pelo método EP, seguido de FOSM e Monte Carlo (com menores PR). Da mesma forma que Ribeiro (2008) e Dell'Avanzi (1995), valores de PR são menores para os métodos rigorosos do que para os métodos simplificados de equilíbrio limite.

A Tabela 1 apresenta um resumo de alguns estudos probabilísticos realizados na Geotecnia, e que serviram de base para o presente trabalho.

Tabela 1 – Estudos probabilísticos em geotecnia

Autor	Estudo de caso - Estabilidade de Talude	Conclusões
Dell'Avanzi (1995)	Barragem Santa Branca	FOSM: PR < por Spencer (1967) e Sarma (1979) FOSM: PR > por Janbu (1956) e Bishop Simplificado (1955) Grande influência da coesão efetiva
Guedes (1997)	Mina do Cauê	Maior influência da coesão efetiva para taludes até 100 m de altura Maior influência do ângulo de atrito efetivo para taludes acima de 100 m de altura Quanto maior a inclinação do talude, maior a PR Quanto mais alto o talude, maior a PR Valores de PR muito próximos para FOSM, EP e Monte Carlo PR de EP > PR de FOSM e Monte Carlo, variando-se a altura dos taludes
Fabício (2006)	Barragem de Curuá-Una	PR de FOSM > PR de EP. Para cotas de nível d'água maiores, a diferença de PR entre os métodos diminuiu. Para superfícies de ruptura consideradas fixas as PR foram maiores do que para superfícies de ruptura livres Maior influência do ângulo de atrito efetivo
Ribeiro (2008)	Barragem de Benguê	FOSM: PR > por Janbu (1956) e Bishop Simplificado (1955) Grande influência da coesão efetiva PR de FOSM > PR de EP Grande influência da coesão efetiva
Silva (2015)	Mina de Alegria	PR de EP > PR de FOSM > PR de Monte Carlo
Araújo (2018)	Barragem Santa Branca	PR de FOSM > PR de Monte Carlo > PR de EP PR pelo método de EP mais divergentes de FOSM e Monte Carlo Grande influência da coesão efetiva
Vecci (2018)	Mina do Cauê	PR por métodos de equilíbrio limite não rigorosos maiores do que para métodos rigorosos PR de EP > PR de FOSM > PR de Monte Carlo Maior influência do ângulo de atrito efetivo (talude de 200 m de altura) Não há muita variação nas PR para superfícies de rupturas fixas ou livres

3

Estudo de Caso: Análise da Estabilidade de um Quebra-mar sobre Argila Mole – Porto de Sergipe

3.1.

Apresentação da Obra

Em 12 de outubro de 1989, ocorreu a ruptura por deslizamento de um quebra-mar de enrocamento em construção para o Terminal Portuário de Sergipe (atualmente denominado Terminal Marítimo Inácio Barbosa), a 2,5 km do litoral, em Barra dos Coqueiros, ao norte de Aracaju, no estado brasileiro de Sergipe (Figura 12). A estrutura possui 800 m de comprimento (Figura 13) e 15,3 m de altura, dos quais 10 m estão submersos pelo nível do mar.

Após o acidente, um novo projeto foi definido para o quebra-mar. A reconstrução foi finalizada em outubro de 1992. Desde então, a estrutura não apresentou mais problemas de estabilidade.



Figura 12 – Vista aérea da localização do quebra-mar do Terminal Portuário de Sergipe

A Figura 13 indica a região onde ocorreu a ruptura do quebra-mar, em 1989.



Figura 13 – Vista aérea aproximada do quebra-mar após reconstrução

Sandroni *et al* (2018) apresentam a sequência de eventos da construção do quebra-mar, as características geotécnicas do terreno de fundação, descrevem os resultados de instrumentação antes e após a ruptura (piezômetros e inclinômetros) e discutem as possíveis causas do acidente e critérios de segurança aceitáveis.

3.2. Características Geológico-Geotécnicas

O quebra-mar está apoiado sobre uma camada de areia de 4 m de espessura, sobrejacente a 8 m de argila mole, a qual está sobre outra camada espessa de areia. A Figura 14 esquematiza o perfil longitudinal do subsolo de fundação ao longo do eixo do quebra-mar.

Entre 1985 e 1992, realizou-se uma ampla campanha de investigações de campo e laboratório, por diferentes instituições, a fim de caracterizar as camadas do subsolo e obter parâmetros de resistência e deformabilidade (Geoprojetos, 1989; Ribeiro, 1992; Brugger, 1996).

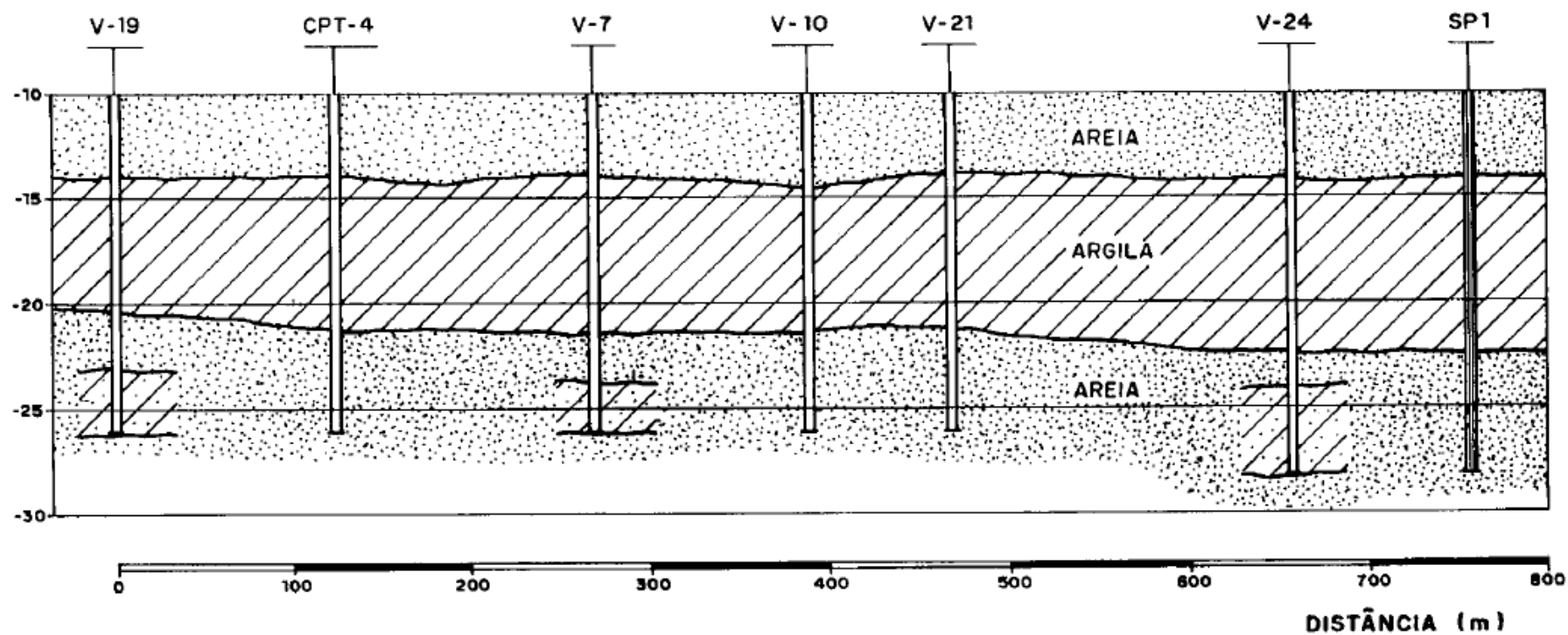


Figura 14 – Perfil geológico ao longo do eixo do quebra-mar (Brugger, 1996)

Ribeiro (1992) apresenta em detalhes uma caracterização geológica da região, identificando a presença de depósitos alternados de areia e argila do Quaternário, bem como de um aquífero de água doce na camada arenosa inferior, confinado pela camada de argila de baixa permeabilidade. Esse aquífero provoca um gradiente hidráulico na camada argilosa, ocasionando o fluxo ascendente de água doce. Piezômetros e ensaios de Piezocone (CPTU - *Cone Penetration Test* com medida de Poropressão) identificaram, na base da camada de argila, um artesianismo de 25 a 30 kPa, acima da pressão hidrostática.

O solo de fundação é considerado horizontalmente homogêneo e a lâmina d'água do mar é de 10 m no local do quebra-mar (Ribeiro, 1992; Brugger *et al*, 1998).

Por se tratar de um material mais suscetível a deformações e eventual instabilidade, a argila mole foi estudada mais detalhadamente. Os ensaios de piezocone revelaram a homogeneidade e poucas lentes de areia. A camada mole é composta de 65% de argila, 30% de silte e 5% de areia fina. Ribeiro (1992) destaca o baixo teor de sais em comparação com outras argilas marinhas do litoral brasileiro, como sendo uma consequência do processo de lixiviação dos sais, causado pelo fluxo ascendente na camada mole, provocado pelo artesianismo. Este foi o provável mecanismo que facilitou o desenvolvimento da ruptura durante a construção do quebra-mar (Brugger *et al*, 1998).

3.3. Seção Típica

De acordo com Brugger (1996) e Guedes (1997), o reprojeto do quebra-mar consistiu em modificar a geometria para incluir bermas de equilíbrio e suavizar as inclinações dos taludes. O resultado foi um aumento da largura do quebra-mar de 122 m para 200 m. Observa-se, também, o deslocamento do eixo original da estrutura em direção ao mar, como indicado na Figura 15.

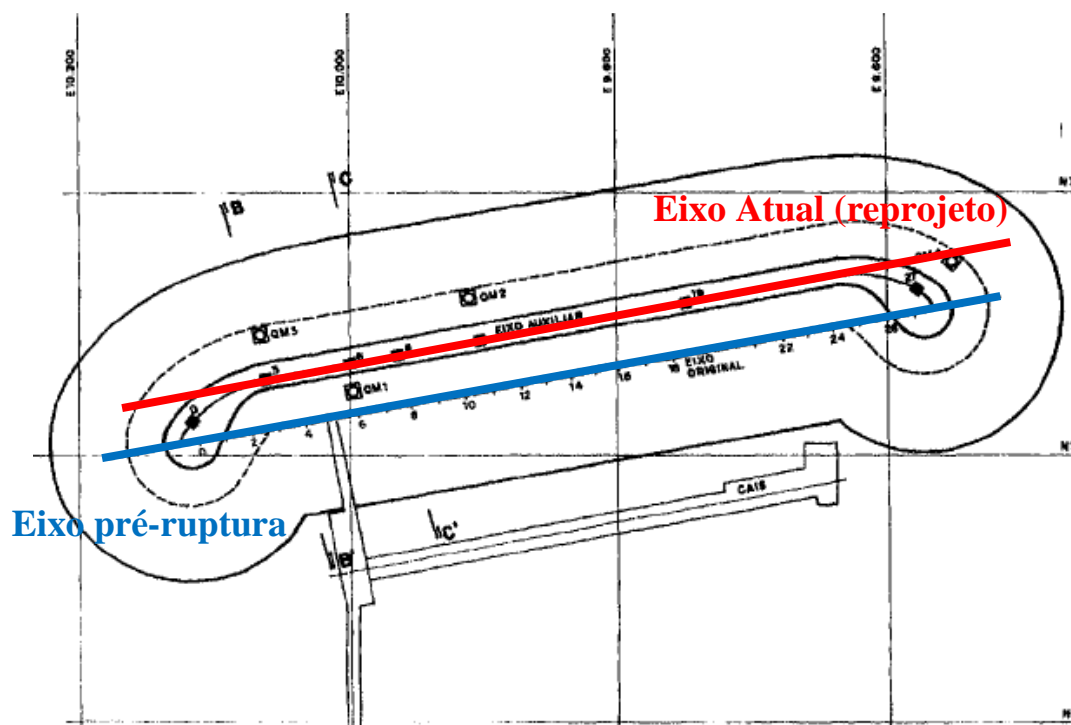


Figura 15 – Planta esquemática do reprojeto do quebra-mar

A Figura 16 mostra a seção típica analisada nesta pesquisa, correspondente à nova geometria do quebra-mar conforme as alterações no reprojeto após a ruptura, incluindo a seção geotécnica do subsolo de fundação.

Nesta figura, a linha pontilhada corresponde à superfície crítica de ruptura de formato poligonal, modelada por Geoprojetos (1992), e identificada com base em dados de campo. O estudo contou com resultados de inclinômetros instalados na obra, ao se reiniciar a construção o quebra-mar. O talude cuja estabilidade é analisada é aquele em direção ao mar. A linha tracejada, por sua vez, corresponde ao nível do mar, 10 m acima da camada superior de areia.

Entre as camadas de areia, ocorre a camada de argila mole, a qual foi dividida em 6 subcamadas, para fins do presente trabalho.

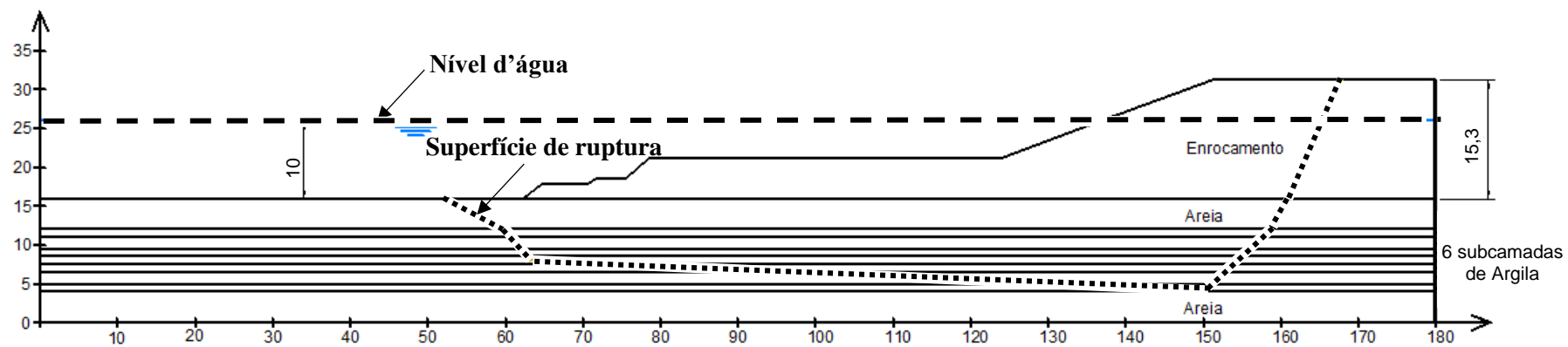


Figura 16 – Seção típica do reprojeito do quebra-mar

3.4. Parâmetros Geotécnicos

Após a definição da seção típica estudada, foram também definidos os parâmetros geotécnicos dos materiais indicados na Figura 16. Esses parâmetros são os dados de entrada para as análises de estabilidade.

As análises de equilíbrio limite foram realizadas com o auxílio da ferramenta computacional Slide 7.0, de uso comum na prática geotécnica.

3.4.1. Enrocamento

Como este material, que é a sobrecarga da obra, fica parte submersa no mar e parte acima do nível d'água, foram adotados os pesos específicos saturado e natural, segundo Brugger (1996) e Geoprojetos, (1992): $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{nat}} = 18 \text{ kN/m}^3$.

De acordo com Geoprojetos (1992), o ângulo de atrito do enrocamento foi considerado igual a $41,5^\circ$.

3.4.2. Areia

Como as camadas de areia estão submersas, adotou-se um peso específico saturado $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$, indicado por Brugger (1996). Guedes (1997) e Geoprojetos (1992) também utilizaram esses mesmos valores em seus estudos sobre o caso em questão.

Guedes (1997) e Geoprojetos (1989), adotaram um ângulo de atrito de $31,5^\circ$ para os solos arenosos.

3.4.3. Argila

Ensaio de laboratório indicaram o peso específico saturado da argila $\gamma_{\text{sat}} = 16 \text{ kN/m}^3$ (Ribeiro, 1992). O mesmo valor foi também adotado pela Geoprojetos (1992) e Brugger (1996).

Neste trabalho foram estudados os cenários de análises em tensões totais e em tensões efetivas. Para o primeiro, leva-se em consideração, além do peso específico, a resistência não-drenada da argila. Para o segundo cenário, foram definidas as

seguintes características da argila: ângulo de atrito efetivo e o parâmetro de poropressão r_u (Equação 29):

$$r_u = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \quad [29]$$

onde:

Δu : acréscimo de poropressão (kPa);

$\Delta \sigma_v$: tensão vertical total (kPa).

Parâmetros da Argila para Análises em Tensões Totais

Para as análises em tensões totais, foi necessário estimar valores de resistência não-drenada (s_u). No presente estudo, adotou-se a interpretação reportada em Geoprojetos (1990), a qual abrange os resultados de s_u dos ensaios de laboratório (triaxiais CU) e de campo (palheta, e piezocone). Nesta interpretação, a camada de argila foi dividida em 3 regiões em função da profundidade, considerando que o topo da camada de argila está na cota -14 m e a base está na cota -22 m. Assim, a resistência não drenada é dada por:

$$s_u = 35,4 + 1,3z \quad \text{para } -16,5 < z < -14,0 \quad [30a]$$

$$s_u = 15,66 + 2,1(-16,5 - z) \quad \text{para } -19,5 < z < -16,5 \quad [30b]$$

$$s_u = 22,9 \quad \text{para } -22,0 < z < -19,5 \quad [30c]$$

No presente estudo, a argila foi dividida em 6 subcamadas, os valores de s_u foram calculados para os pontos médios de cada subcamada, com base nas Equações 30a a 30c, e os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de resistência não drenada para as subcamadas de argila

Camada de Argila	z (m)	s_u (kPa)
Subcamada 1	-14,50	16,6
Subcamada 2	-15,75	14,9
Subcamada 3	-17,00	16,7
Subcamada 4	-18,00	18,7
Subcamada 5	-19,00	20,7
Subcamada 6	-20,25	22,9

Parâmetros da Argila para Análises em Tensões Efetivas

De acordo com o exposto por Brugger (1996), a partir dos 18 ensaios triaxiais realizados pelas instituições COPPE, PUC-Rio e MIT, o ângulo de atrito efetivo médio (ϕ') é $28,8^\circ$. Entretanto, as retroanálises do reprojeto reportadas por Geoprojetos (1992) indicaram um ângulo de atrito efetivo de $8,5^\circ$. No presente trabalho, verificou-se a retroanálise da ruptura, fazendo uso do modelo geométrico apresentado na Figura 16 e de $\phi' = 8,5^\circ$ para a argila.

Assim, apresentam-se aqui análises probabilísticas da ruptura para ambos os valores de ângulo de atrito: $28,8^\circ$, derivado dos ensaios triaxiais, e $8,5^\circ$, indicado na retroanálise da ruptura.

O parâmetro r_u foi calculado a partir dos dados dos 6 piezômetros instalados em diferentes profundidades ao longo do furo QM 3 (Figura 17).

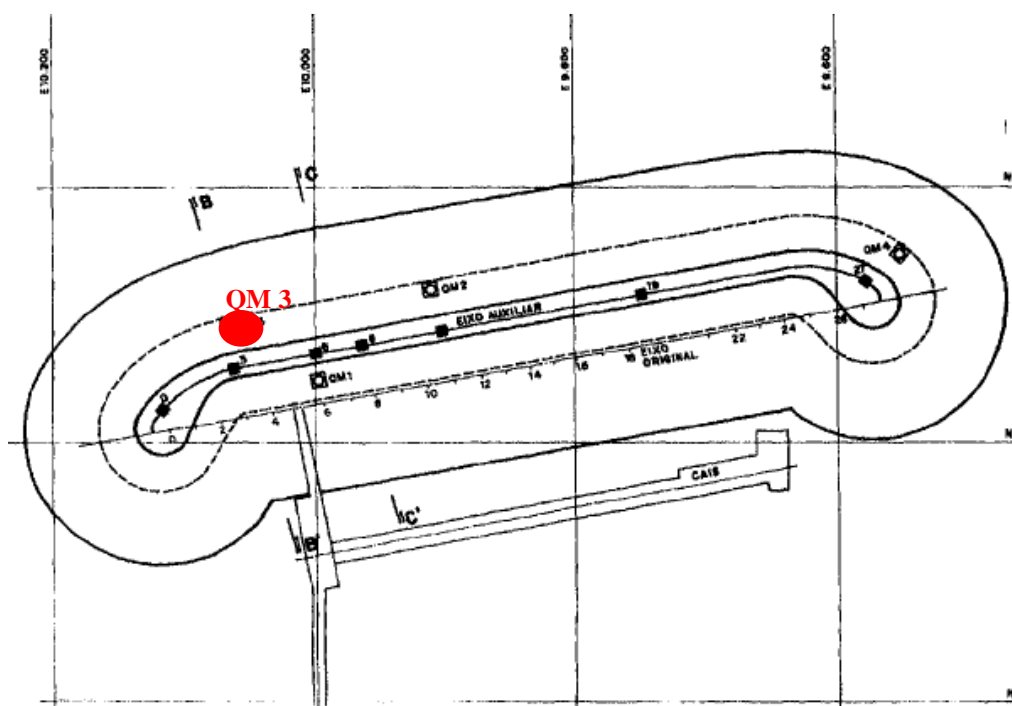


Figura 17 – Localização do furo QM 3 com os piezômetros

Os valores das leituras desses piezômetros foram reportados por Brugger (1996), e os mesmos já contemplam o artesianismo existente na camada de argila. Acima desse furo, o acréscimo de tensão vertical total no solo devido ao carregamento do quebra-mar é de 104 kPa. Os valores de r_u para cada subcamada de argila são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de r_u por profundidade na camada de argila

Camada de Argila	z (m)	Δu (kPa)	r_u
Subcamada 1	-17,01	52	0,500
Subcamada 2	-17,61	58	0,558
Subcamada 3	-18,58	64	0,615
Subcamada 4	-19,11	57	0,548
Subcamada 5	-20,01	72	0,692
Subcamada 6	-22,00	48	0,462

3.5.

Definição das Variáveis Aleatórias

Para as análises probabilísticas do caso aqui estudado, é essencial definir os valores dos parâmetros de entrada como variáveis aleatórias.

Além dos parâmetros dos materiais definidos no Item 3.4, o nível d'água (NA) do mar foi também inicialmente considerado uma variável aleatória, visto que a lâmina d'água oscila com a maré.

Assim, para cada parâmetro foram definidos valores de média e desvio padrão. Os valores de média foram definidos no Item 3.4, e os de desvio padrão estão definidos neste item.

O coeficiente de variação (CV) para o peso específico de solos diversos pode variar entre 1 e 10% (Lee *et al*, 1983). Foi, portanto, adotado um valor de 5% aplicado na Equação 8.

Lee *et al* (1983) recomendam ainda que, para ϕ' de areias, o valor de CV seja igual a 10%. Para o ϕ' do enrocamento adotou-se CV = 30%, indicado por Marachi *et al* (1969).

Brugger (1996) indica que os valores de resistência não drenada dos ensaios reportados por Geoprojetos (1990) mostram uma variação de 5 kPa em torno da média, sendo este o valor adotado como desvio padrão.

Segundo Guedes (1997), a partir de um conjunto de dados de leituras de piezômetros, observou-se que o nível d'água mínimo na região era de 10 m com variância de 0,2, calculada com as fórmulas convencionais da estatística (ver item 2.2.1.2). Assim, o desvio padrão do NA pode ser considerado igual a 0,45 m.

A Tabela 4 apresenta os valores das variáveis aleatórias das análises em tensões totais.

Tabela 4 –Variáveis aleatórias para estudo em Tensões Totais

Variável Aleatória	Média (\bar{x})	Desvio-padrão (σ)
γ_{nat} enrocamento (kN/m ³)	18,0	0,9
γ_{sat} enrocamento (kN/m ³)	20,0	1,0
ϕ' enrocamento (°)	41,5	12,45
γ_{sat} areia (kN/m ³)	20,0	1,0
ϕ' areia (°)	31,5	3,15
γ_{sat} argila (kN/m ³)	16,0	0,8
NA (m)	10,0	0,45
S_u subcamada 1 (kPa)	16,6	5,0
S_u subcamada 2 (kPa)	14,9	5,0
S_u subcamada 3 (kPa)	16,7	5,0
S_u subcamada 4 (kPa)	18,7	5,0
S_u subcamada 5 (kPa)	20,7	5,0
S_u subcamada 6 (kPa)	22,9	5,0

Para análises em tensões efetivas, é necessário ainda definir os valores de desvio-padrão de ϕ' da argila e dos fatores r_u . Não há um acervo literário extenso que indique a variabilidade do parâmetro r_u . Entretanto, o estudo desenvolvido por Flores (2008) reporta valores de desvio padrão para r_u em solo argiloso, em função de leituras piezométricas no campo. Flores (2008) demonstra que o desvio padrão de r_u pode chegar a 40% do valor médio. Com base nesse estudo, adotou-se no presente trabalho um valor de CV = 40% para o fator r_u .

O desvio padrão de ϕ' obtido com os ensaios triaxiais é de 3,25°. Já para o ϕ' de 8,5° obtido por retroanálise, utilizou-se o valor de CV = 10%, recomendado por Lee *et al* (1983).

A Tabela 5 apresenta os valores das variáveis aleatórias para as análises em tensões efetivas.

Tabela 5 – Variáveis aleatórias para estudo em Tensões Efetivas

Variável Aleatória	Média (\bar{x})	Desvio-padrão (σ)
γ_{nat} enrocamento (kN/m ³)	18,0	0,9
γ_{sat} enrocamento (kN/m ³)	20,0	1,0
ϕ' enrocamento (°)	41,5	12,45
γ_{sat} areia (kN/m ³)	20,0	1,0
ϕ' areia (°)	31,5	3,15
γ_{sat} argila (kN/m ³)	16,0	0,8
ϕ' argila (°)	28,8	3,25
	8,5	0,85
NA (m)	10,0	0,45
r_u subcamada 1	0,500	0,200
r_u subcamada 2	0,558	0,223
r_u subcamada 3	0,615	0,246
r_u subcamada 4	0,548	0,219
r_u subcamada 5	0,692	0,277
r_u subcamada 6	0,462	0,185

3.6.

Análises Probabilísticas para a Situação após a Reconstrução

Com os valores de média e desvio-padrão das variáveis aleatórias definidos no item anterior, é possível realizar as análises probabilísticas da seção típica do reprojeto do quebra-mar do Terminal Portuário de Sergipe.

Para os diferentes tipos de análises aqui abordados, o primeiro método estudado foi o FOSM, uma vez que este permite uma verificação de quais variáveis aleatórias que mais influenciam a segurança do caso em análise (Sayão *et al*, 2012).

3.6.1.

Aplicação do Método FOSM

Análises Determinísticas

Como exposto no Item 2.3.1, este método de cálculo probabilístico demanda, além de n análises de estabilidade inerentes à variação das variáveis aleatórias, uma análise de estabilidade determinística, ou seja, adotando os valores de média para todos os parâmetros.

Os métodos de equilíbrio limite aqui analisados foram: Janbu Simplificado, Janbu Corrigido, Spencer e Morgenstern-Price, os quais podem ser utilizados para superfícies de ruptura poligonais.

A Tabela 6 apresenta os resultados dessas análises determinísticas, as quais foram modeladas conforme geometria apresentada na Figura 16.

Tabela 6 – Valores dos fatores de segurança (FS) das análises determinísticas

Tipo de Análise	Método de Equilíbrio Limite	FS _{DET}
Tensões Totais	Janbu Simplificado	1,295
	Janbu Corrigido	1,391
	Spencer	1,411
	Morgenstern-Price	1,359
Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=28,8^\circ$	Janbu Simplificado	3,615
	Janbu Corrigido	3,884
	Spencer	4,371
	Morgenstern-Price	4,012
Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=8,5^\circ$	Janbu Simplificado	1,393
	Janbu Corrigido	1,496
	Spencer	1,543
	Morgenstern-Price	1,475

A Figura 18 apresenta um exemplo do resultado de uma das análises determinísticas, na qual o FS calculado diz respeito à superfície de ruptura poligonal definida na modelagem.

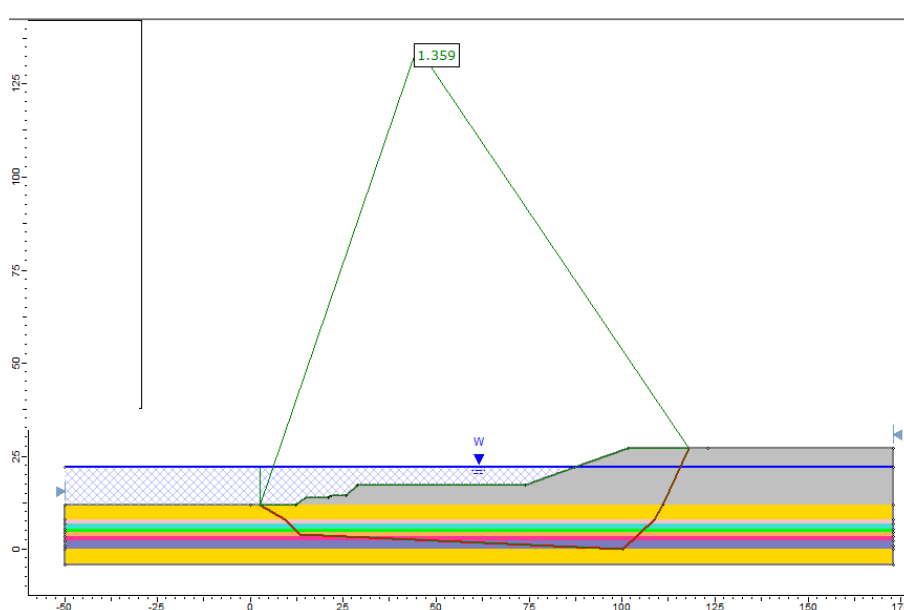


Figura 18 – Exemplo do cálculo do FS

Verificação da Influência dos Parâmetros

O método FOSM permitiu avaliar quais os parâmetros considerados variáveis aleatórias que mais influenciavam na variação do fator de segurança e, portanto, no valor do índice de confiabilidade (β). Quanto maior a variação, menor o valor de β (menor a confiabilidade na análise de estabilidade) e, portanto, maior a probabilidade de ruptura.

Os resultados dessas avaliações são apresentados a seguir para cada método de equilíbrio limite objeto desse estudo, fazendo uso do procedimento FOSM.

De acordo com as definições apresentadas pela metodologia FOSM para cálculo do índice de confiabilidade, tem-se:

- \bar{x} é o valor médio da variável aleatória;
- $\bar{x} + \partial x$ é o valor médio da variável aleatória incrementado de uma variação de 10% (ver Item 2.3.1);
- $FS[\bar{x} + \partial x]$ é o fator de segurança resultante da variação de 10% sobre determinada variável aleatória;
- $\partial FS / \partial x$ é a derivada parcial do FS com relação a uma variável x , calculada como uma variação no FS causada por pequena variação no parâmetro x (variável aleatória independente). Portanto, essa derivada consiste na diferença entre o FS calculado para uma variação de 10% de uma variável aleatória e o FS da análise determinística, dividido pela própria variação de 10% no parâmetro. Alguns desses valores são negativos, o que não caracteriza um problema, já que essa parcela é elevada ao quadrado:

$$\frac{\partial FS}{\partial x} = \frac{FS[\bar{x} + \partial x] - FS_{DET}}{\partial x} \quad [31]$$

- $V[x]$ é a variância da variável aleatória, como resultado do quadrado de seu desvio-padrão;
- A parcela $(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$ diz respeito ao quanto que cada variável influencia na variação do FS da análise. Essa influência é medida como uma porcentagem do somatório dessas parcelas.

Esse método exige que uma análise de estabilidade seja feita para a variação de cada variável (ou parâmetro) x , enquanto as demais são mantidas fixas. Sendo

assim, são necessárias $N+1$ análises de estabilidade, onde N é o número de variáveis aleatórias, além da análise determinística, na qual todas as variáveis estão com seu valor médio.

Os resultados dos parâmetros que são variáveis aleatórias e que mais influenciam na variância do FS nos cálculos probabilísticos pela metodologia FOSM são apresentados nas Figuras 19 a 21.

Nota-se a influência de cada parâmetro para a análise em termos de tensões totais. Para todos os métodos de equilíbrio limite concluiu-se que os parâmetros de maior influência no modelo analisado são: s_u da subcamada 6, $\phi'_{\text{enrocamento}}$, s_u da subcamada 5 e $\gamma_{\text{sat enrocamento}}$.

A Figura 20 apresenta os resultados para a análise em termos de tensões efetivas, considerando que o $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$ (oriundo dos ensaios triaxiais). A Figura 21 apresenta os resultados para a análise em termos de tensões efetivas, considerando que o $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$ (oriundo da retroanálise da ruptura). De acordo com os resultados, os parâmetros de maior influência são: r_u da subcamada 6, r_u da subcamada 5, ϕ'_{argila} e $\phi'_{\text{enrocamento}}$.

A influência dos parâmetros é decorrente do formato da superfície de ruptura poligonal estudada neste trabalho. Como grande trecho dessa superfície crítica passa pelas subcamadas 5 e 6 de argila, os parâmetros de resistência destes materiais têm maior influência na variância do FS.

No Apêndice A deste trabalho encontram-se as planilhas dos cálculos cujos resultados são apresentados.

A partir dessa avaliação, o número de parâmetros tomados como variáveis aleatórias do problema pode ser reduzido de 13 ou 14 para 4. Dessa forma, torna-se possível prosseguir com os demais métodos de cálculo probabilísticos. Caso fossem mantidos os 13 parâmetros como variáveis aleatórias, seriam exigidas $2^{13} = 8192$ análises para o método de Estimativas Pontuais.

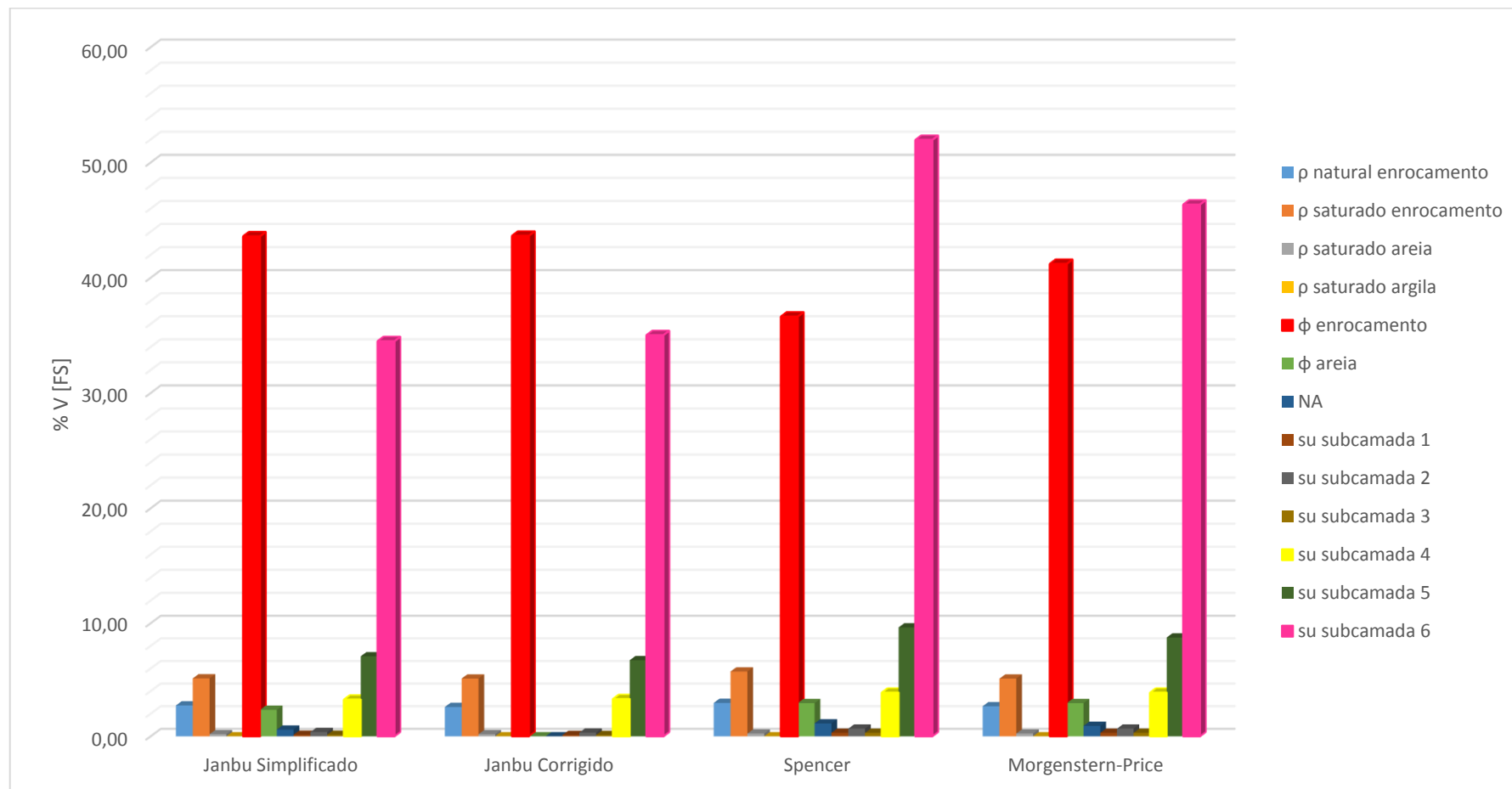


Figura 19 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões totais

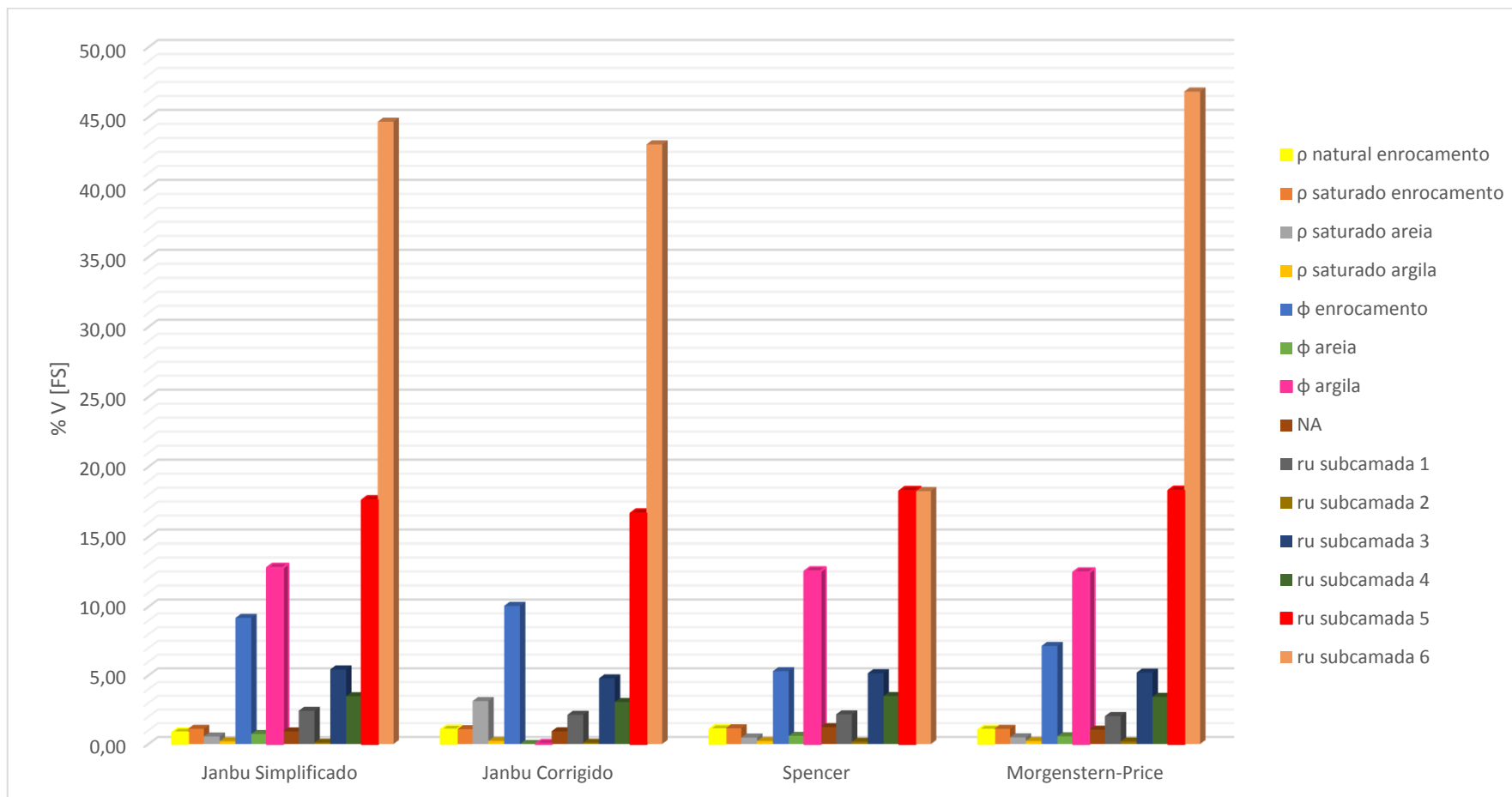


Figura 20 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$

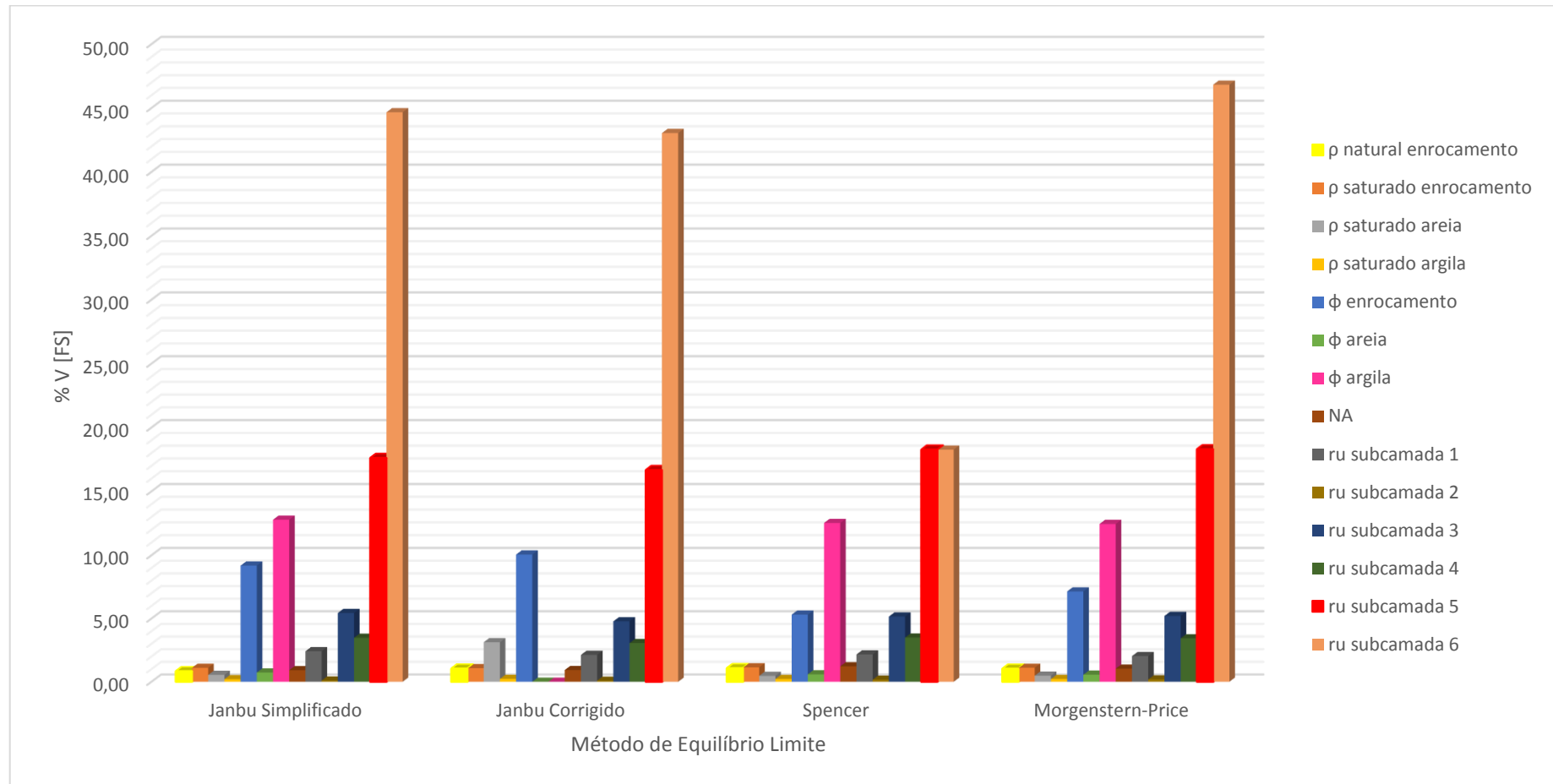


Figura 21 – Influência dos parâmetros na variância do FS – análise em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$

Resultados das Análises FOSM

O procedimento dos cálculos da análise probabilística pela metodologia FOSM é apresentado por meio de planilhas no Apêndice B deste trabalho. Os resultados de índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (PR) estão indicados na Tabela 7, na Tabela 8 e na Tabela 9 para os respectivos cenários das análises em tensões totais, em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$, e em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$.

Para as análises em tensões totais, ou seja, considerando a argila com comportamento não drenado, nota-se que o método de Janbu Simplificado apresenta o menor β e, portanto, a maior PR. Os demais métodos apresentam valores mais próximos entre si, com PR variando entre 1/141 e 1/99.

Tabela 7 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões totais

Método de Equilíbrio Limite	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,898	2,88	1/35
Janbu Corrigido	2,321	1,01	1/99
Spencer	2,452	0,71	1/141
Morgenstern-Price	2,172	1,49	1/67

Para as análises em tensões efetivas adotando um ângulo de atrito de $28,8^\circ$ e fator de poropressão r_u para a argila, observa-se que todos os métodos apresentaram índices de confiabilidade coerentes entre si.

Tabela 8 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	3,236	0,061	1/1639
Janbu Corrigido	3,319	0,045	1/2222
Spencer	3,322	0,045	1/2222
Morgenstern-Price	3,303	0,048	1/2083

Para as análises em tensões efetivas adotando um ângulo de atrito de $8,5^\circ$ e fator de poropressão r_u para a argila, os métodos apresentaram coerência entre si e, da mesma forma que para as análises expostas anteriormente, o menor β foi obtido para o método de Janbu Simplificado.

Tabela 9 – Resultado da análise probabilística FOSM para tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,664	4,81	1/21
Janbu Corrigido	1,987	2,35	1/43
Spencer	1,974	2,42	1/41
Morgenstern-Price	1,839	3,29	1/30

A Figura 22 apresenta esses resultados das análises probabilísticas para os diferentes cenários, fazendo uso da metodologia FOSM.

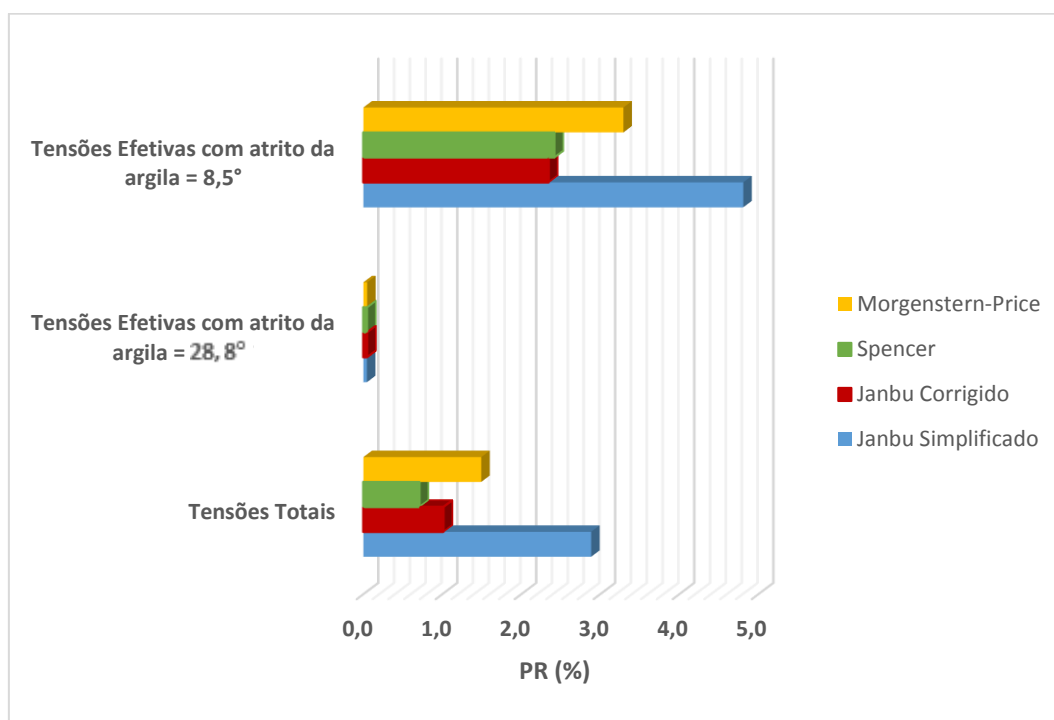


Figura 22 – Resultados da análise probabilística FOSM

As Figuras 23 a 25 apresentam a influência de cada parâmetro considerado variável aleatória, na variância do FS e, conseqüentemente, na confiabilidade do problema. Para o método de Janbu, tanto o que utiliza a formulação simplificada quanto a que utiliza um fator de correção, o ângulo de atrito do enrocamento é o de maior influência. Já para os métodos de Spencer e Morgenstern-Price, o s_u da subcamada 6 da argila teve maior influência na estabilidade.

Na Figura 23 pode-se notar que o ângulo de atrito do enrocamento e a resistência não-drenada da argila da subcamada 6 são os parâmetros de maior influência.

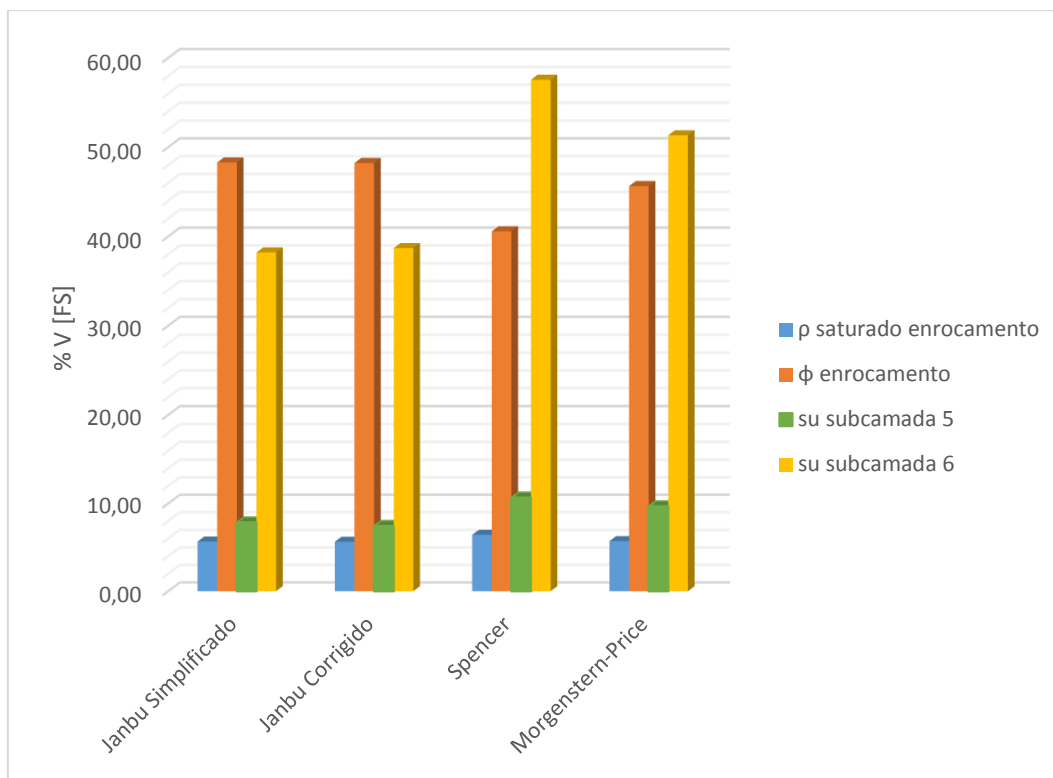


Figura 23 – Influência dos parâmetros para análises em tensões totais

A Figura 24 e a Figura 25 mostram que o fator r_u da subcamada 6 de argila é a variável aleatória com mais influência no FS, nas análises em tensões efetivas.

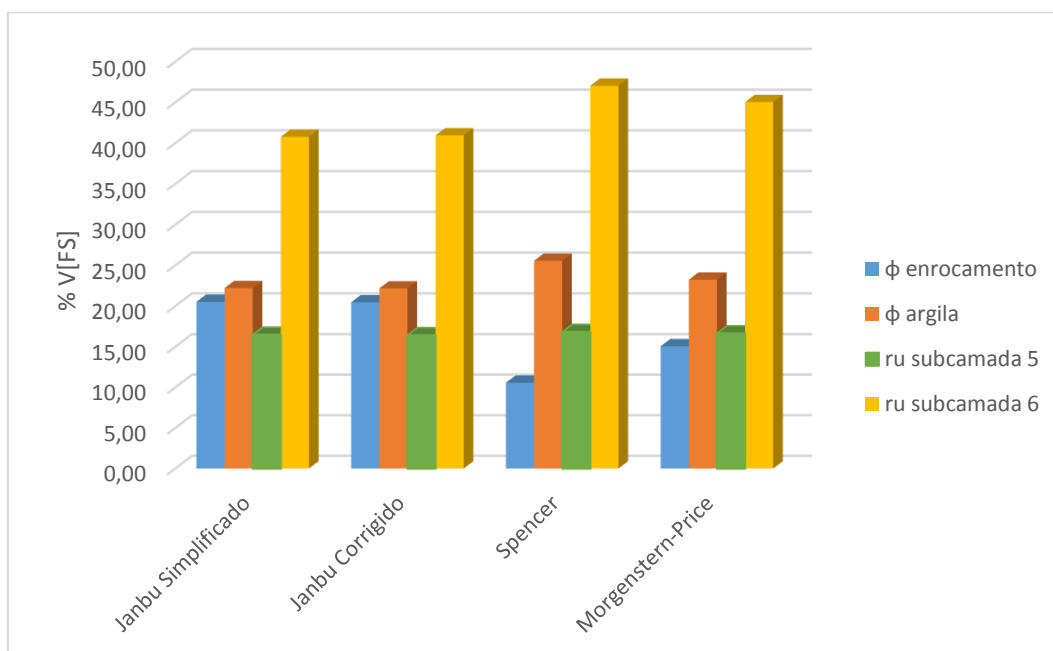


Figura 24 – Influência das variáveis aleatórias para análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$

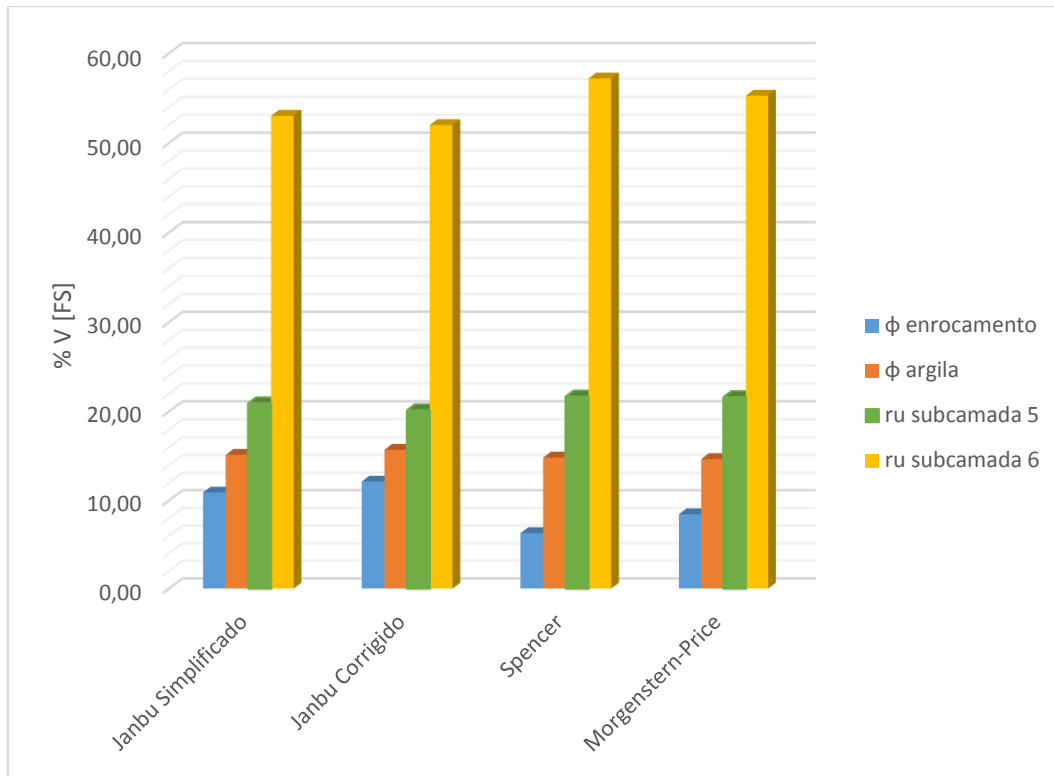


Figura 25 – Influência das variáveis aleatórias para análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$

3.6.2. Aplicação do Método de Estimativas Pontuais

Para as análises em tensões totais, tendo-se definido 4 variáveis aleatórias independentes, prosseguiu-se com o cálculo probabilístico pelo método de Estimativas Pontuais, realizando-se, portanto, 16 análises de estabilidade para cada método de equilíbrio limite.

Cada uma dessas análises consiste em uma combinação das variáveis aleatórias, com seus valores médios acrescidos e reduzidos de seus desvios-padrão.

No Apêndice C são apresentadas as planilhas de cálculo que apresentam o cálculo probabilístico pelo método de Estimativas Pontuais. Estas planilhas mostram que o método calcula o fator de segurança médio de todas as 16 análises ($E[FS]$), e a média do quadrado dos fatores de segurança ($E[FS^2]$) de cada análise. A partir de então, a variância é obtida pela Equação 32 (simplificação da Equação 23):

$$V[FS] = E[FS^2] - (E[FS])^2 \quad [32]$$

A Tabela 10 apresenta os valores das variáveis aleatórias adotados no cálculo desse método para as análises em tensões totais. Já as Tabelas 11 e 12 dizem respeito aos valores para as análises em tensões efetivas.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões totais

Variável aleatória	$\bar{x} + \sigma$ (média + desvio-padrão)	$\bar{x} - \sigma$ (média - desvio-padrão)
γ_{sat} enrocamento (kN/m ³)	20 + 1 = 21	20 - 1 = 19
ϕ' enrocamento (°)	41,5 + 12,45 = 53,95	41,5 - 12,45 = 29,05
s_u subcamada 5 (kPa)	20,7 + 5 = 25,7	20,7 - 5 = 15,7
s_u subcamada 6 (kPa)	22,9 + 5 = 27,9	22,9 - 5 = 17,9

Tabela 11 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com

$$\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$$

Variável aleatória	$\bar{x} + \sigma$ (média + desvio-padrão)	$\bar{x} - \sigma$ (média - desvio-padrão)
ϕ' enrocamento (°)	41,5 + 12,45 = 53,95	41,5 - 12,45 = 29,05
ϕ' argila (°)	28,8 + 3,25 = 32,05	28,8 - 3,25 = 25,55
r_u subcamada 5	0,692 + 0,277 = 0,969	0,692 - 0,277 = 0,415
r_u subcamada 6	0,462 + 0,185 = 0,647	0,462 - 0,185 = 0,277

Tabela 12 – Valores dos parâmetros no cálculo por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com

$$\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$$

Variável aleatória	$\bar{x} + \sigma$ (média + desvio-padrão)	$\bar{x} - \sigma$ (média - desvio-padrão)
ϕ' enrocamento (°)	41,5 + 12,45 = 53,95	41,5 - 12,45 = 29,05
ϕ' argila (°)	8,5 + 0,85 = 9,35	8,5 - 0,85 = 7,65
r_u camada 5	0,692 + 0,277 = 0,969	0,692 - 0,277 = 0,415
r_u camada 6	0,462 + 0,185 = 0,647	0,462 - 0,185 = 0,277

Os resultados das análises probabilísticas pela metodologia de Estimativas Pontuais são apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15.

Para as análises em tensões totais, ou seja, considerando a argila com comportamento não drenado, nota-se que o método de Janbu Simplificado (1956) apresenta o menor β e, portanto, a maior PR. Os demais métodos apresentam valores mais próximos entre si, com PR variando entre 1/151 e 1/71.

Assim como mostrou a metodologia FOSM anteriormente, para os 3 cenários estudados, o método de Janbu Simplificado (1956) apresenta as maiores probabilidades de ruptura, enquanto que o método de Spencer (1967) exibe as menores. Além disso, observa-se que todos os métodos de equilíbrio limite apresentaram resultados coerentes entre si. Os métodos Janbu Corrigido (1973), Spencer (1967) e Morgenstern-Price (1965) apresentam maior concordância no que diz respeito ao valor de β .

Tabela 13 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões totais

Método de Equilíbrio Limite	E[FS]	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,296	1,840	3,29	1/30
Janbu Corrigido	1,393	2,260	1,19	1/84
Spencer	1,421	2,476	0,66	1/151
Morgenstern-Price	1,365	2,198	1,40	1/71

Tabela 14 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	E[FS]	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	3,695	3,304	0,05	1/2000
Janbu Corrigido	3,970	3,388	0,04	1/2500
Spencer	4,483	3,458	0,03	1/3333
Morgenstern-Price	4,108	3,387	0,04	1/2500

Tabela 15 – Resultado da análise probabilística por Estimativas Pontuais para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	E[FS]	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,460	1,517	6,46	1/15
Janbu Corrigido	1,568	1,745	4,05	1/25
Spencer	1,657	1,945	2,59	1/39
Morgenstern-Price	1,566	1,748	4,03	1/25

A Figura 26 apresenta os resultados das análises probabilísticas pelo método de Estimativas Pontuais, considerando os 3 diferentes cenários de tipos de análises e 4 métodos de equilíbrio limite.

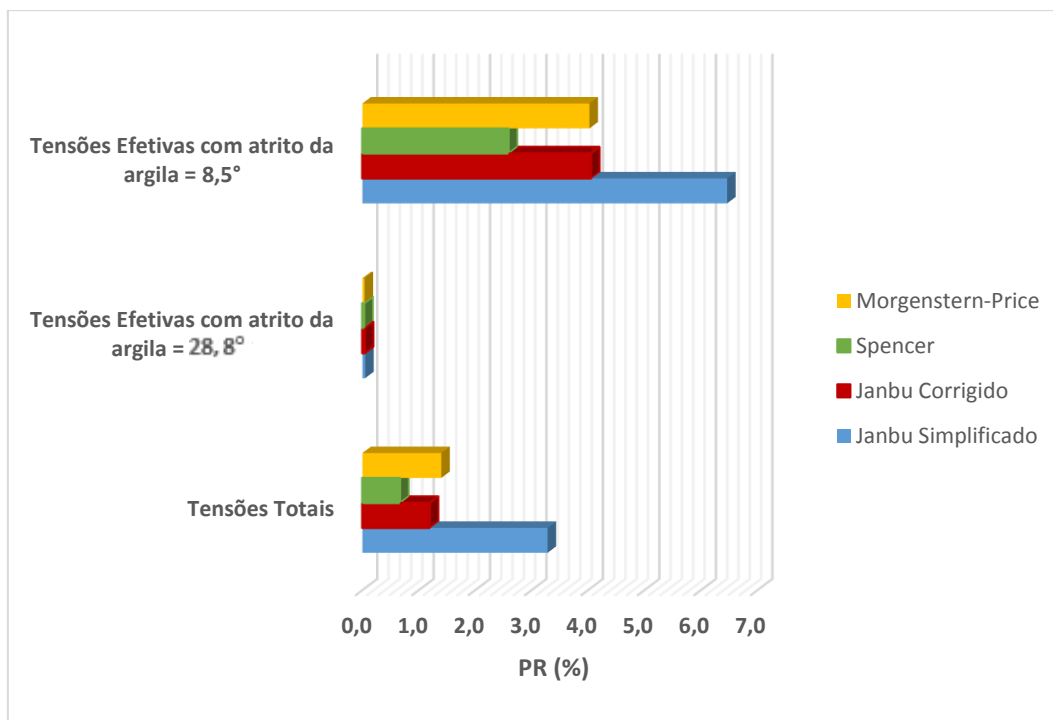


Figura 26 – Resultados da análise probabilística por Estimativas Pontuais

3.6.3. Aplicação do Método de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo foi calculada pela ferramenta computacional Slide 7.0, sendo os dados de entrada os parâmetros de todos os materiais do modelo, além das médias e desvios-padrão dos parâmetros considerados variáveis aleatórias independentes (conforme definido no Item 3.6.1).

As Tabela 16, 17 e 18 indicam os resultados das análises probabilísticas com uso da ferramenta de Simulação de Monte Carlo. Esta metodologia, além de β e PR, fornece também o cálculo de FS médio.

Da mesma forma que para as análises por FOSM e por Estimativas Pontuais, o método de Monte Carlo calculou índices de confiabilidade menores para o método de equilíbrio limite de Janbu Simplificado (1956), e maiores para o método de Spencer (1967).

Tabela 16 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões totais

Método de Equilíbrio Limite	FS MÉDIO	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,312	1,801	3,59	1/28
Janbu Corrigido	1,410	2,200	1,38	1/72
Spencer	1,431	2,391	0,84	1/119
Morgenstern-Price	1,379	2,133	1,65	1/61

Tabela 17 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=28,8^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	FS MÉDIO	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	3,687	4,004	0,0031	1/32258
Janbu Corrigido	3,961	4,107	0,0020	1/50000
Spencer	4,454	4,315	0,0008	1/125000
Morgenstern-Price	4,094	4,170	0,0015	1/66666

Tabela 18 – Resultado da análise probabilística por Monte Carlo para tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}}=8,5^\circ$

Método de Equilíbrio Limite	FS MÉDIO	β	PR (%)	PR (fração)
Janbu Simplificado	1,460	1,624	5,22	1/19
Janbu Corrigido	1,568	1,869	3,08	1/32
Spencer	1,647	2,113	1,73	1/58
Morgenstern-Price	1,563	1,892	2,92	1/34

A Figura 27 apresenta os resultados das análises probabilísticas pelo uso da Simulação de Monte Carlo, considerando os 3 diferentes cenários de tipos de análises e 4 métodos de equilíbrio limite.

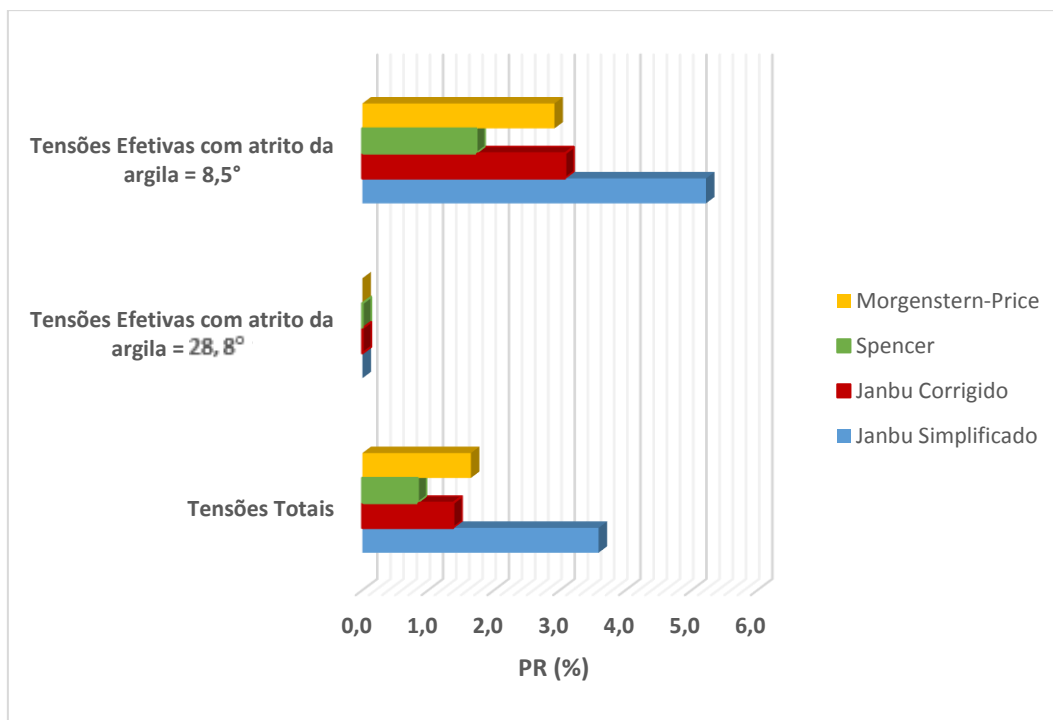


Figura 27 – Resultados da análise probabilística pela Simulação de Monte Carlo

3.6.4.

Comparação dos Resultados

Independentemente do método de equilíbrio limite, o cenário que apresentou maior probabilidade de ruptura da estrutura do quebra-mar foi por tensões efetivas, considerando que o ângulo de atrito efetivo da argila é de 8,5°.

As análises em tensões totais (Figura 28) traduzem que a menor e a maior PR são calculadas por FOSM e por Monte Carlo, respectivamente, para os métodos de Janbu Simplificado (1956) e Janbu Corrigido (1973). Entretanto, os métodos rigorosos de Spencer (1967) e Morgenstern-Price (1965) apresentaram PR menores para a metodologia probabilística de Estimativas Pontuais. Vale ressaltar também que, cada método de equilíbrio limite apresentou valores de PR consistentes para cada tipo de método probabilístico.

As análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$ (Figura 29) mostram que as PR calculadas por FOSM e por Estimativas Pontuais são muito semelhantes e cerca de 10 vezes maiores que as calculadas por Monte Carlo.

O *software* solicita como *input* valores máximo e mínimo relativos ao valor médio. O manual do programa recomenda que esses valores sejam iguais a três vezes o desvio-padrão, uma vez que para distribuições normais 99,7% das amostras

geradas no método de Monte Carlo situam-se dentro deste intervalo. Entretanto, neste caso o programa não permitiu que adotássemos este valor, o que levou à necessidade de reduzir para manualmente os valores máximo e mínimo. Acredita-se, portanto, que isto pode ter levado aos resultados discrepantes de PR em relação às outras metodologias probabilísticas.

As análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ (Figura 30) mostram que as PR calculadas por Estimativas Pontuais são maiores. Para os métodos rigorosos, as menores PR são calculadas pela simulação de Monte Carlo. Somando-se a isso, não se verifica muita variação entre os valores de PR, estando dentro de uma mesma ordem de grandeza (de 1,7 a 6,5%).

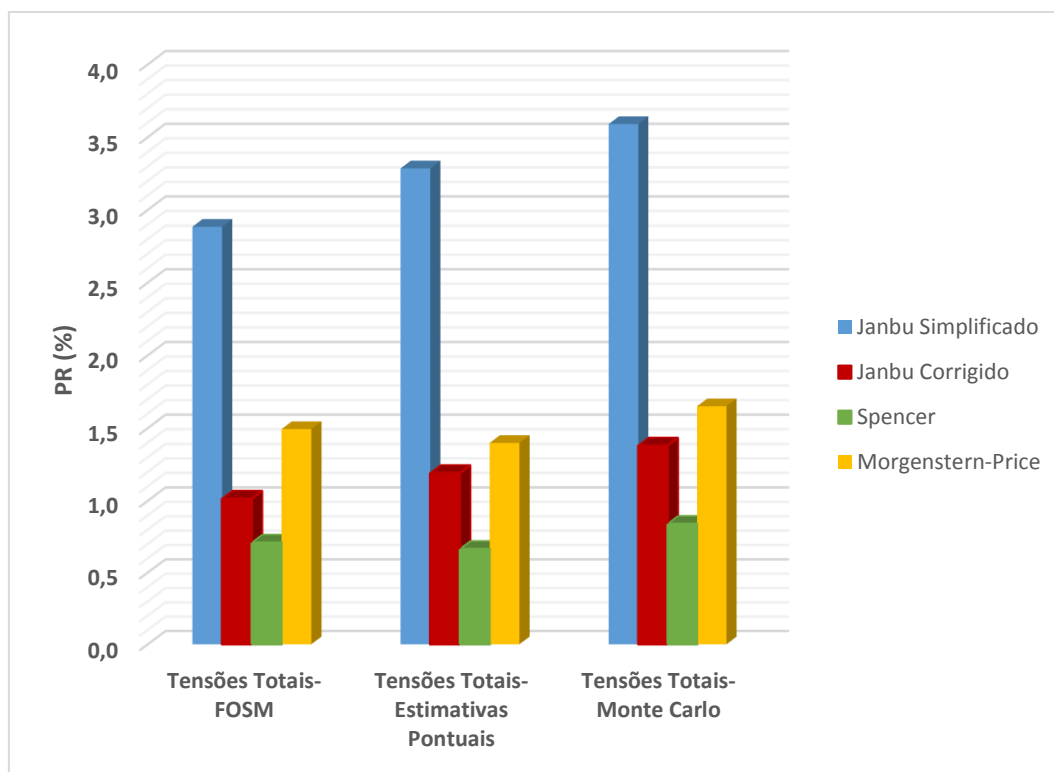


Figura 28 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Totais

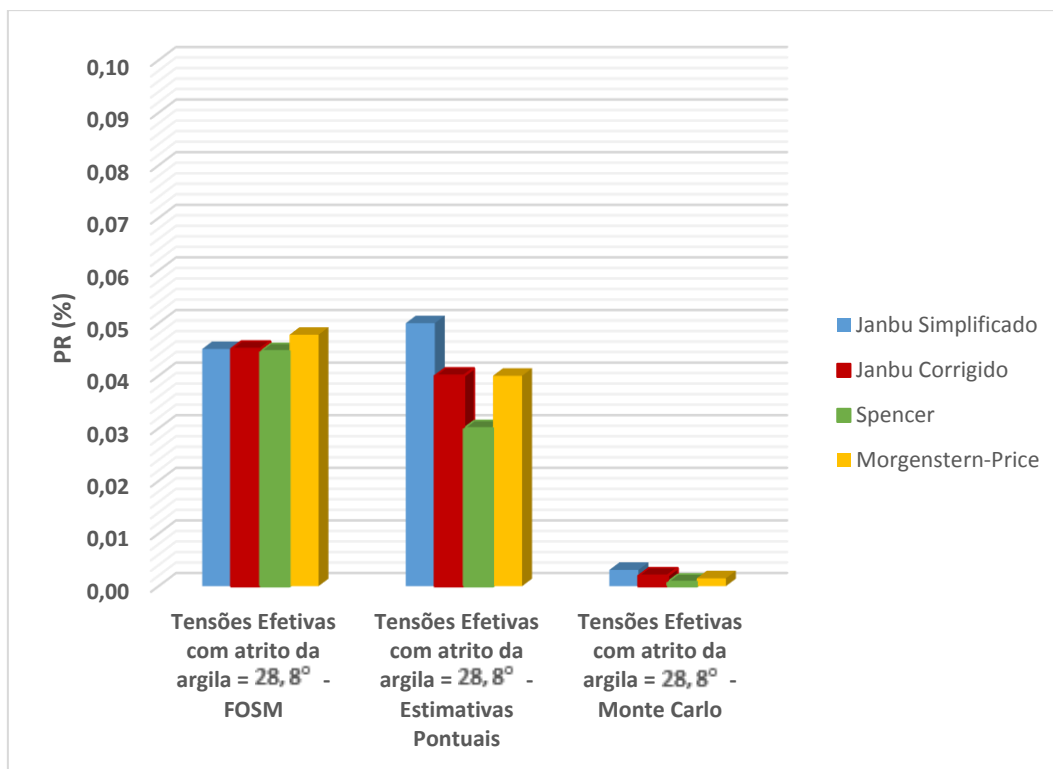


Figura 29 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$

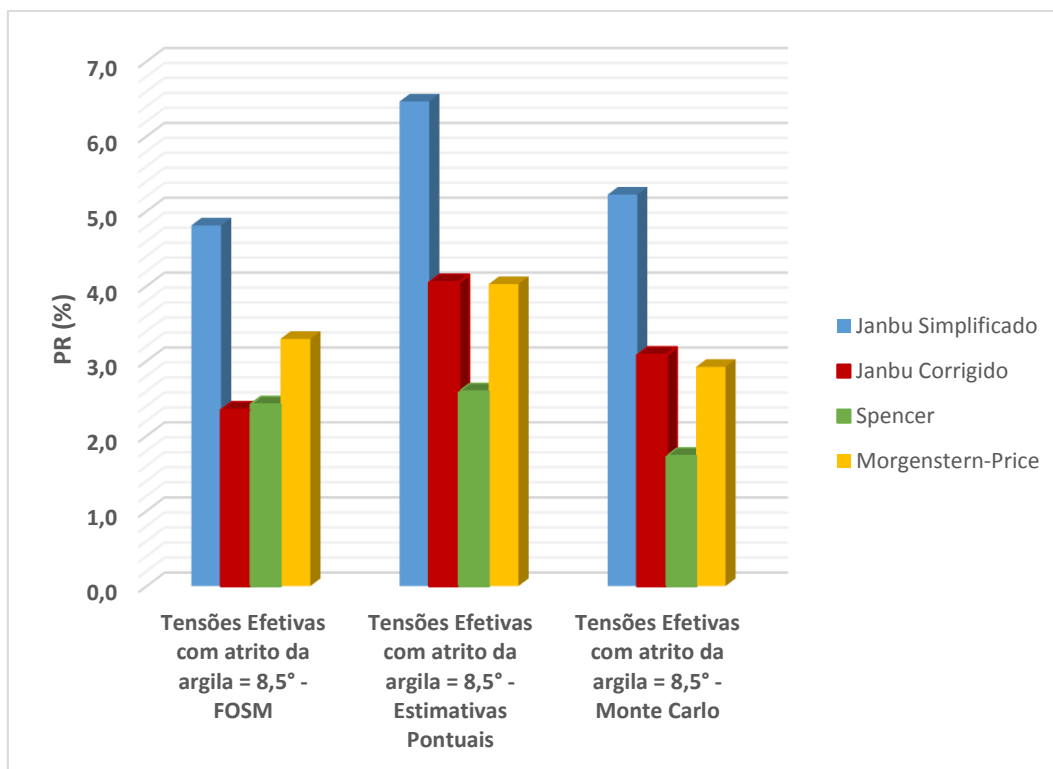


Figura 30 – Comparação dos métodos probabilísticos – Tensões Efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$

4

Conclusões e Recomendações de Trabalhos Futuros

4.1.

Conclusões

Este trabalho abordou a aplicação de métodos probabilísticos usuais no meio geotécnico para cálculo de estabilidade de taludes. Inicialmente, foram apresentados os conceitos básicos acerca de estatística e probabilidade, bem como uma comparação entre estudos determinísticos e probabilísticos. Em seguida, alguns estudos de casos anteriores sobre o tema foram discutidos. Os métodos probabilísticos aqui apresentados foram: FOSM, Estimativas Pontuais e Simulação de Monte Carlo, com aplicação ao caso do Quebra-mar do Terminal Portuário de Sergipe, o qual sofreu uma ruptura durante sua construção, em outubro de 1989. O objetivo foi analisar o nível de segurança da nova geometria do quebra-mar, após sua reconstrução, com base nos valores de índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura, analisados em 3 cenários distintos:

- Em termos de tensões totais, com a resistência não drenada da argila obtida em ensaios de palheta e piezocone, no campo, e ensaios triaxiais no laboratório;
- Em termos de tensões efetivas, com o ângulo de atrito efetivo da argila igual a $28,8^\circ$ (obtido em ensaios triaxiais);
- Em termos de tensões efetivas, com o ângulo de atrito efetivo da argila igual a $8,5^\circ$ (resultante de retroanálise da ruptura efetuada durante a fase de reprojeto). Esta retroanálise foi reproduzida e verificada pela autora.

Considerando os métodos de equilíbrio limite rigorosos, Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967), os resultados apresentam-se bem similares para as análises em tensões totais e análises em tensões efetivas com o ângulo de atrito efetivo da argila obtido por retroanálise.

O cenário de tensões totais apresenta PR próximas a 1/70 (entre 1 e 2%).

As análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$ levou a valores de PR próximos a 1/2100. Neste cenário, A PR calculada está próxima de 1/60.000, ou seja, muito discrepante. Acredita-se que isso ocorra pelo fato de que o *software* não aceita que sejam utilizados no *input* valores máximo e mínimo igual a três vezes o desvio-padrão.

As análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ indicaram PR em torno de 1/30 (variando entre 2,4 e 4%).

Nos 3 cenários abordados, os valores de β e PR calculados pela metodologia FOSM são similares aos calculados por Estimativas Pontuais.

A simulação de Monte Carlo apresentou valores de β maiores nas análises em tensões efetivas, quando comparados aos métodos de FOSM e Estimativas Pontuais. Entretanto, nas análises em tensões totais, os valores de β obtidos pela simulação de Monte Carlos são menores.

Os valores de β na modelagem com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$ são bem maiores que os calculados nos outros dois cenários, o que pode ser explicado pelo valor elevado de atrito, que implica em uma maior resistência ao cisalhamento da argila. Entretanto, um maior ângulo de atrito indica uma abordagem menos conservadora. No momento da ruptura e nos pontos por onde passam a superfície de ruptura, esse ângulo de atrito é muito inferior, pois o material perde resistência, devido à lixiviação dos sais da argila ocasionada pelo artesianismo constatado no campo.

Com base nos estudos reportados no presente trabalho, pode-se concluir que os métodos FOSM e Estimativas Pontuais são os mais recomendados para estudo probabilístico da estabilidade geotécnica, utilizando os métodos de equilíbrio limite rigorosos de Spencer (1967) ou Morgenstern-Price (1965). Do ponto de vista prático, o método FOSM oferece maior facilidade nos cálculos.

No que concerne ao tipo de modelagem a ser indicada para obras em argila mole, deve-se adotar a análise em tensão total ou em tensão efetiva, considerando uma redução do ângulo de atrito efetivo do material. Para este último cenário, cabem medições de poropressão com piezômetros. As leituras dos piezômetros estão associadas a uma grande variabilidade, inerente ao próprio instrumento e à distribuição de tensões nos diferentes pontos do solo. No caso aqui analisado, para o fator de poropressão r_u utilizou-se um coeficiente de variação $CV = 40\%$.

A autora também estudou a possibilidade de se utilizar os parâmetros A e B de Skempton para acréscimo de poropressão devido a um carregamento. Entretanto, os valores encontrados para diferentes pontos da camada de argila mole foram muito dispersos. Acredita-se que os resultados não permitiram um estudo conclusivo pelo fato desses parâmetros se aplicarem a carregamentos axissimétricos. Portanto, optou-se por não evoluir nesses estudos.

4.2. Recomendações de Trabalhos Futuros

O meio geotécnico deve continuar promovendo pesquisas sobre estudos probabilísticos em casos de obra diversos, o que deve colaborar para uma maior compreensão do comportamento de materiais geotécnicos e do nível de segurança das obras.

Este trabalho tratou de um estudo de caso de análise de estabilidade sobre argila mole sensível. Recomenda-se o estudo de outras aplicações geotécnicas, tais como a segurança de fundações, aterros, contenções, escavações, túneis, etc.

Com relação ao estudo de caso apresentado neste trabalho, recomenda-se:

- Estudar outras obras em que há ocorrência de argila mole e medições de poropressão, para obter valores reais do coeficiente de variação para o fator de poropressão r_u ;
- Reavaliar o método de Monte Carlo para entender como o *software* processa os cálculos, e saber se os valores máximo e mínimo adotados explicam discrepância desses resultados em relação às outras metodologias FOSM e Estimativas Pontuais;
- Realizar novas análises para o método FOSM, com porcentagens de variação dos parâmetros diferentes do valor de 10% adotado, tal como sugerido por Avanzi e Sayão (1998), para a estimativa das derivadas parciais de FS em relação às diferentes variáveis consideradas na análise.

5

Referências bibliográficas

ANG, A. H. S. e TANG, W (1975). **Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Basic Principles**. John Wiley & Sons, New York, USA, vol. 1, p.p. 422.

ARAÚJO, M. B. (2018). **Considerações Sobre Análise Probabilística em Estabilidade de Taludes de Barragem**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

BAECHER G.B., & CHRISTIAN, J.T. (2003). **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. John Wiley & Sons, USA.

BISHOP, A. W. (1955). **The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes**. Geotéchnique, Inglaterra, vol. 5, n. 1, p.p. 7-17.

BRUGGER, P. J. (1996). **Análises de Deformações em Aterros sobre Solos Moles**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

BRUGGER, P. J., ALMEIDA, M. S. S., SANDRONI, S. S., LACERDA, W. A. (1998). **Analysis of the Breakwater Construction of Sergipe Harbour, Brazil**. Canadian Geotech. Journal, vol. 35, p.p. 1018-1031.

CHRISTIAN, J. T., LADD, C. C. e BAECHER, G. B (1992). **Reliability Applied to Slope Stability Analysis**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 120 (12), p.p. 2180-2207.

DELL'AVANZI, E. (1995). **Confiabilidade e Probabilidade em Análises de Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

DELL'AVANZI, E. e SAYÃO, A. S. F. J. (1998). **Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes**. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília.

DUTRA, V. A. S. (2013). **Projeto de Estabilização de Taludes e Estruturas de Contenção Englobando Dimensionamento Geotécnico e Estrutural**. Projeto de Graduação, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FABRÍCIO, J. V. F. (2006). **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

FELLENIOUS, W. (1936). **Calculation of the Stability of Earth Dams**. Transactions 2nd Congress on Large Dams, Washington, D. C., USA, vol. 4, p.p. 445-459.

FLORES, E. A. F. (2008). **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

GEOPROJETOS, ENGENHARIA LTDA. (1989). **Aspectos Geotécnicos da Ruptura Ocorrida no Quebra-mar**. Terminal Portuário de Sergipe, Relatório: R-120190-137-11.

GEOPROJETOS, ENGENHARIA LTDA. (1990). **Prospecções Geotécnicas de Campo e Laboratório**. Terminal Portuário de Sergipe, Relatório: R-200590-137-20.

GEOPROJETOS, ENGENHARIA LTDA. (1992). **Avaliação Global**. Relatório: R.210592-137-38.

GUEDES, M. C. S. (1997). **Considerações sobre Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

JANBU, N., BJERRUM, L., KJAERNSLI, B. (1956). **Soil mechanics applied to some engineering problems**. Publication 16. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.

JANBU, N. (1973). **Slope Stability Computations. Embankment Dam engineering**. Casagrande Volume, J. Wiley and Sons, USA. p.p. 47-86.

LEE, I. K., WEEKS, W. e INGLES, O. G. (1983). **Geotechnical Engineering**. Ed. Pitman. Marshfield, USA.

MARACHI, N. D., CHAN, C. K., SEED, H. B. e DUNCAN, J. M. (1969). **Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials**. Relatório TE-69-5, Univ. of California, Berkeley, USA.

MORGENSTERN, N. R. and PRICE, V. E. (1965). **The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces**. Geotéchnique, vol. 15 (1), p.p. 79-93.

MORLÁ-CATALÁN, J. e CORNELL, C. A (1976). **Earth Slope Reliability by a Level Crossing Method**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102 (GT6), p.p. 591-604.

REZENDE, D. A. (2013). **Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeito**. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RIBEIRO, L. F. M. (1992). **Ensaio de Laboratório para Determinação das Características Geotécnicas da Argila Mole de Sergipe**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

RIBEIRO, R. C. H. (2008). **Aplicações de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

ROCSCIENCE. Slide versão 7.0. Rocscience, Toronto, Ontario, Canada.

ROSENBLUETH, R.Y. (1975). **Point Estimates for Probability Moments**. Proc. of the National Academy of Sciences, Mathematics Section, vol. 72 (10), p.p. 3812-3814.

SANDRONI, S. S. e SAYÃO, A. S. F. J (1992). **Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de Taludes**. 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes, Rio de Janeiro, ABMS, vol.2, p.p. 523-535.

SANDRONI, S. S., SANTANA, F. C., RAMOS, J. M. S. e SAYÃO, A. S. F. J. (1992). **Talude Rompido em Solo Saprolítico de Micaxisto na Mina do Cauê**. 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes, Rio de Janeiro, ABMS, vol. 1, p.p. 285-292.

SANDRONI, S. S. (2017). **Capítulo 5, Poropressões**. Notas de aula, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

SANDRONI, S. S., LACERDA, W. E TASSI, M. (2018). **Landslide During Construction of a Rockfill Breakwater In the Coast of Sergipe, Brazil**. International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Rio de Janeiro, PUC-Rio.

SAYÃO, A. S. F. J. (2017). **Segurança de Barragens, Considerações Geotécnicas**. Notas de aula, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

SAYÃO, A. S. F. J., SANDRONI, S.S., FONTOURA, S.A.B. e RIBEIRO, R.C.H. (2012). **Considerations on the Probability of Failure of Mine Slopes**. Soils and Rocks, ABMS, vol. 35, N. 1, January-April 2012, p.p. 31-38.

SILVA, C. C. (2015). **Análise de Estabilidade de um talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística**. Dissertação de Mestrado, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto.

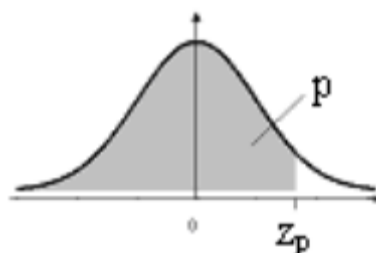
SPENCER E. (1967). **A Method of Analysis of the Stability of Embankment Assuming Inter-Slice Forces**. Geotechnique, vol. 17, p.p.11-26.

VECCI, A. N. (2018). **Análises Probabilísticas de um Talude de Mineração**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

WHITMAN, R. V. (1984). **Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering**, 17ª Terzaghi Lecture, Journal of the Geotech. Eng. Division, ASCE, vol. 110 (2), p.p. 145-188.

Anexo

Distribuição Normal Padrão Acumulada



z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3,0	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998
3,5	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998	0,9998

Apêndice

Apêndice A - Influência dos parâmetros na variância do FS

Tabela A.1 – Influência das variáveis aleatórias em tensões totais– Janbu Simplificado (s_u em kPa)

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	Janbu Simplificado				
			$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
$\gamma_{\text{enrocamento nat}}$ (kN/m ³)	18,0	19,8	1,241	-0,030	0,8	7,29E-04	2,72
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,221	-0,037	1,0	1,37E-03	5,12
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,309	0,007	1,0	4,90E-05	0,18
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,295	0,000	0,6	0,00E+00	0,00
$\phi_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,331	0,009	155,0	1,17E-02	43,59
ϕ_{areia} (°)	31,5	34,65	1,320	0,008	9,9	6,25E-04	2,34
NA (m)	10,0	11,0	1,323	0,028	0,2	1,57E-04	0,59
s_u subcamada 1	16,6	18,2	1,297	0,001	25	3,65E-05	0,14
s_u subcamada 2	14,9	16,4	1,298	0,002	25	1,01E-04	0,38
s_u subcamada 3	16,7	18,3	1,297	0,001	25	3,60E-05	0,13
s_u subcamada 4	18,7	20,5	1,306	0,006	25	8,67E-04	3,24
s_u subcamada 5	20,7	22,8	1,313	0,009	25	1,89E-03	7,08
s_u subcamada 6	22,9	25,2	1,339	0,019	25	9,23E-03	34,49

Tabela A.2 – Influência das variáveis aleatórias em tensões totais – Janbu Corrigido (s_u em kPa)

Variáveis Aleatórias	Janbu Corrigido						
	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V [x]$	% de V[FS]
$\gamma_{\text{enrocamento nat}}$ (kN/m ³)	18,0	19,8	1,334	-0,032	0,8	8,12E-04	2,59
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,311	-0,040	1,0	1,60E-03	5,10
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,406	0,007	1,0	5,62E-05	0,18
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,391	0,000	0,6	0,00E+00	0,00
$\phi_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,430	0,009	155,0	1,37E-02	43,64
ϕ_{areia} (°)	31,5	34,65	1,418	0,009	9,9	7,29E-04	2,32
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,421	0,030	0,2	1,80E-04	0,57
s_u subcamada 1	16,6	18,2	1,393	0,001	25	3,65E-05	0,12
s_u subcamada 2	14,9	16,4	1,394	0,002	25	1,01E-04	0,32
s_u subcamada 3	16,7	18,3	1,393	0,001	25	3,60E-05	0,11
s_u subcamada 4	18,7	20,5	1,403	0,006	25	1,03E-03	3,29
s_u subcamada 5	20,7	22,8	1,410	0,009	25	2,11E-03	6,72
s_u subcamada 6	22,9	25,2	1,439	0,021	25	1,10E-02	35,02

Tabela A.3 – Influência das variáveis aleatórias em tensões totais – Spencer (s_u em kPa)

Variáveis Aleatórias	Spencer						
	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V [x]$	% de V[FS]
$\gamma_{\text{enrocamento nat}}$ (kN/m ³)	18,0	19,8	1,350	-0,034	0,8	9,30E-04	2,95
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,326	-0,043	1,0	1,81E-03	5,73
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,427	0,008	1,0	6,40E-05	0,24
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,412	0,001	0,6	2,50E-07	0,00
$\phi_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,444	0,008	155,0	9,80E-03	36,63
ϕ_{areia} (°)	31,5	34,65	1,439	0,009	9,9	7,84E-04	2,93
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,450	0,039	0,2	3,04E-04	1,14
s_u subcamada 1	16,6	18,2	1,414	0,002	25	8,21E-05	0,31
s_u subcamada 2	14,9	16,4	1,415	0,003	25	1,80E-04	0,67
s_u subcamada 3	16,7	18,3	1,414	0,002	25	8,10E-05	0,30
s_u subcamada 4	18,7	20,5	1,423	0,006	25	1,03E-03	3,86
s_u subcamada 5	20,7	22,8	1,432	0,010	25	2,58E-03	9,63
s_u subcamada 6	22,9	25,2	1,465	0,024	25	1,39E-02	51,96

Tabela A.4 – Influência das variáveis aleatórias em tensões totais – Morgenstern-Price (s_u em kPa)

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	Morgenstern-Price				
			$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
$\gamma_{\text{enrocamento nat}}$ (kN/m ³)	18,0	19,8	1,302	-0,032	0,8	8,12E-04	2,65
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,280	-0,040	1,0	1,56E-03	5,10
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,375	0,008	1,0	6,40E-05	0,24
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,360	0,001	0,6	2,50E-07	0,00
$\phi_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,394	0,008	155,0	1,10E-02	41,21
ϕ_{areia} (°)	31,5	34,65	1,387	0,009	9,9	7,84E-04	2,93
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,394	0,035	0,2	2,45E-04	0,92
s_u subcamada 1	16,6	18,2	1,362	0,002	25	8,21E-05	0,31
s_u subcamada 2	14,9	16,4	1,363	0,003	25	1,80E-04	0,67
s_u subcamada 3	16,7	18,3	1,362	0,002	25	8,10E-05	0,30
s_u subcamada 4	18,7	20,5	1,371	0,006	25	1,03E-03	3,86
s_u subcamada 5	20,7	22,8	1,379	0,010	25	2,34E-03	8,74
s_u subcamada 6	22,9	25,2	1,410	0,022	25	1,24E-02	46,34

Tabela A.5 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$ – Janbu Simplificado

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	Janbu Simplificado				
			$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
$\gamma_{\text{enrocamento nat}}$ (kN/m ³)	18,0	19,8	3,464	-0,084	0,81	5,70E-03	0,77
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	3,482	-0,067	1,0	4,42E-03	0,60
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	3,695	0,040	1,0	1,60E-03	0,22
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	3,687	0,045	0,64	1,30E-03	0,18
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	3,737	0,029	155,00	1,34E-01	18,18
ϕ'_{areia} (°)	31,5	34,65	3,620	0,002	9,92	2,50E-05	0,00
ϕ'_{argila} (°)	28,8	3,25	3,952	0,117	0,72	1,45E-01	19,68
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	3,454	-0,161	0,200	5,18E-03	0,70
r_u subcamada 1	0,500	0,550	3,586	-0,580	0,250	1,35E-02	1,83
r_u subcamada 2	0,558	0,613	3,608	-0,126	0,311	7,84E-04	0,11
r_u subcamada 3	0,615	0,677	3,571	-0,715	0,379	3,10E-02	4,20
r_u subcamada 4	0,548	0,603	3,579	-0,657	0,300	2,07E-02	2,81
r_u subcamada 5	0,692	0,762	-1,184	0,077	0,479	1,08E-01	14,60
r_u subcamada 6	0,462	0,508	-2,795	0,034	0,213	2,66E-01	36,13

Tabela A.6 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$ – Janbu Corrigido

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	Janbu Corrigido			
				$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	3,722	-0,090	0,81	6,56E-03	0,77
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	3,742	-0,071	1,0	5,04E-03	0,59
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	3,970	0,043	1,0	1,85E-03	0,22
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	3,961	0,048	0,64	1,48E-03	0,17
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	4,015	0,032	155,00	1,54E-01	18,16
ϕ'_{areia} ($^\circ$)	31,5	34,65	3,890	0,002	9,92	3,60E-05	0,00
ϕ'_{argila} ($^\circ$)	28,8	3,25	4,246	0,126	0,72	1,67E-01	19,68
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	3,711	-0,173	0,200	5,99E-03	0,70
r_u subcamada 1	0,500	0,550	3,853	-0,620	0,250	1,54E-02	1,81
r_u subcamada 2	0,558	0,613	3,877	-0,126	0,311	7,84E-04	0,09
r_u subcamada 3	0,615	0,677	3,837	-0,764	0,379	3,53E-02	4,16
r_u subcamada 4	0,548	0,603	3,846	-0,693	0,300	2,31E-02	2,72
r_u subcamada 5	0,692	0,762	3,796	-1,271	0,479	1,24E-01	14,57
r_u subcamada 6	0,462	0,508	3,745	-3,012	0,213	3,09E-01	36,35

Tabela A.7 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$ – Spencer

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	Spencer			
				$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	4,184	-0,104	0,81	8,74E-03	0,76
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	4,204	-0,084	1,0	6,97E-03	0,61
$\gamma_{\text{areia sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	4,475	0,052	1,0	2,70E-03	0,24
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	4,467	0,060	0,64	2,30E-03	0,20
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	4,481	0,027	155,00	1,09E-01	9,51
ϕ'_{areia} ($^\circ$)	31,5	34,65	4,380	0,003	9,92	8,10E-05	0,01
ϕ'_{argila} ($^\circ$)	28,8	3,25	4,825	0,158	0,72	2,63E-01	22,99
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	4,153	-0,218	0,200	9,50E-03	0,83
r_u subcamada 1	0,500	0,550	4,349	-0,440	0,250	7,74E-03	0,68
r_u subcamada 2	0,558	0,613	4,362	-0,161	0,311	1,30E-03	0,11
r_u subcamada 3	0,615	0,677	4,318	-0,861	0,379	4,49E-02	3,93
r_u subcamada 4	0,548	0,603	4,327	-0,803	0,300	3,10E-02	2,71
r_u subcamada 5	0,692	0,762	4,267	-1,502	0,479	1,73E-01	15,12
r_u subcamada 6	0,462	0,508	4,197	-3,770	0,213	4,84E-01	42,31

Tabela A.8 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 28,8^\circ$ – Morgenstern-Price

Variáveis Aleatórias	Morgenstern-Price						
	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	3,838	-0,097	0,81	7,57E-03	0,81
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	3,858	-0,077	1,0	5,93E-03	0,64
γ_{areia} sat (kN/m ³)	20,0	22,0	4,103	0,046	1,0	2,07E-03	0,22
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	4,095	0,052	0,64	1,72E-03	0,18
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	4,130	0,028	155,00	1,25E-01	13,42
ϕ' areia ($^\circ$)	31,5	34,65	4,018	0,002	9,92	3,60E-05	0,00
ϕ'_{argila} ($^\circ$)	28,8	3,25	4,401	0,135	0,72	1,93E-01	20,70
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	3,819	-0,193	0,200	7,45E-03	0,80
r_u subcamada 1	0,500	0,550	3,981	-0,620	0,250	1,54E-02	1,65
r_u subcamada 2	0,558	0,613	4,005	-0,126	0,311	7,84E-04	0,08
r_u subcamada 3	0,615	0,677	3,964	-0,780	0,379	3,69E-02	3,95
r_u subcamada 4	0,548	0,603	3,973	-0,712	0,300	2,43E-02	2,61
r_u subcamada 5	0,692	0,762	3,919	-1,343	0,479	1,38E-01	14,82
r_u subcamada 6	0,462	0,508	3,859	-3,315	0,213	3,75E-01	40,12

Tabela A.9 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ – Janbu Simplificado

Variáveis Aleatórias	Janbu Simplificado						
	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	1,440	0,026	0,81	5,52E-04	0,83
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,339	-0,027	1,0	7,29E-04	1,10
γ_{areia} sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,431	0,019	1,0	3,61E-04	0,55
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,416	0,014	0,64	1,32E-04	0,20
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	1,419	0,006	155,00	6,08E-03	9,19
ϕ' areia ($^\circ$)	31,5	34,65	1,415	0,007	9,92	4,84E-04	0,73
ϕ'_{argila} ($^\circ$)	8,5	9,35	1,485	0,108	0,72	8,46E-03	12,78
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,448	0,055	0,200	6,05E-04	0,91
r_u subcamada 1	0,500	0,550	1,383	-0,200	0,250	1,60E-03	2,42
r_u subcamada 2	0,558	0,613	1,391	-0,036	0,311	6,40E-05	0,10
r_u subcamada 3	0,615	0,677	1,378	-0,244	0,379	3,60E-03	5,44
r_u subcamada 4	0,548	0,603	1,381	-0,219	0,300	2,30E-03	3,48
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,366	-0,390	0,479	1,17E-02	17,61
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,350	-0,932	0,213	2,96E-02	44,67

Tabela A.10 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ – Janbu Corrigido

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	Janbu Corrigido			
				$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	1,440	-0,031	0,81	7,84E-04	1,04
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,439	-0,029	1,0	8,12E-04	1,08
γ_{areia} sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,593	0,049	1,0	2,35E-03	3,13
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,522	0,016	0,64	1,69E-04	0,22
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	1,525	0,007	155,00	7,57E-03	10,06
ϕ' areia ($^\circ$)	31,5	34,65	1,520	0,008	9,92	5,76E-04	0,77
ϕ' argila ($^\circ$)	8,5	9,35	1,595	0,116	0,72	9,80E-03	13,02
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,555	0,059	0,200	6,96E-04	0,92
r_u subcamada 1	0,500	0,550	1,486	-0,200	0,250	1,60E-03	2,13
r_u subcamada 2	0,558	0,613	1,494	-0,036	0,311	6,40E-05	0,09
r_u subcamada 3	0,615	0,677	1,481	-0,244	0,379	3,60E-03	4,78
r_u subcamada 4	0,548	0,603	1,484	-0,219	0,300	2,30E-03	3,06
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,468	-0,404	0,479	1,25E-02	16,66
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,451	-0,975	0,213	3,24E-02	43,04

Tabela A.11 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas com $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ – Spencer

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS [\bar{x} + \partial x]$	Spencer			
				$\partial FS / \partial x$	V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	1,481	-0,034	0,81	9,61E-04	1,07
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,479	-0,032	1,0	1,02E-03	1,14
γ_{areia} sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,584	0,021	1,0	4,20E-04	0,47
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,571	0,018	0,64	1,96E-04	0,22
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	1,566	0,006	155,00	4,76E-03	5,31
ϕ' areia ($^\circ$)	31,5	34,65	1,566	0,007	9,92	5,29E-04	0,59
ϕ' argila ($^\circ$)	8,5	9,35	1,649	0,125	0,72	1,12E-02	12,52
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,617	0,074	0,200	1,10E-03	1,22
r_u subcamada 1	0,500	0,550	1,532	-0,220	0,250	1,94E-03	2,16
r_u subcamada 2	0,558	0,613	1,540	-0,054	0,311	1,44E-04	0,16
r_u subcamada 3	0,615	0,677	1,526	-0,276	0,379	4,62E-03	5,15
r_u subcamada 4	0,548	0,603	1,529	-0,255	0,300	3,14E-03	3,50
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,511	-0,462	0,479	1,64E-02	18,26
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,491	-1,127	0,213	4,33E-02	48,23

Tabela A.12 – Influência das variáveis aleatórias em tensões efetivas *com* $\phi'_{argila} = 8,5^\circ$ – Morgenstern-Price

Variáveis Aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \partial x$	$FS[\bar{x} + \partial x]$	$\partial FS / \partial x$	Spencer		
					V [x]	$(\partial FS / \partial x)^2 \cdot V[x]$	% de V[FS]
γ enrocamento nat (kN/m ³)	18,0	19,8	1,418	-0,032	0,81	8,12E-04	1,03
γ enrocamento sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,416	-0,030	1,0	8,70E-04	1,11
γ areia sat (kN/m ³)	20,0	22,0	1,514	0,020	1,0	3,80E-04	0,48
γ_{argila} (kN/m ³)	16,0	17,6	1,501	0,016	0,64	1,69E-04	0,21
ϕ' enrocamento ($^\circ$)	41,5	45,65	1,500	0,006	155,00	5,62E-03	7,15
ϕ' areia ($^\circ$)	31,5	34,65	1,496	0,007	9,92	4,41E-04	0,56
ϕ' argila ($^\circ$)	8,5	9,35	1,574	0,116	0,72	9,80E-03	12,45
Lâmina d'água (m)	10,0	11,0	1,539	0,064	0,200	8,19E-04	1,04
r_u subcamada 1	0,500	0,550	1,465	-0,200	0,250	1,60E-03	2,03
r_u subcamada 2	0,558	0,613	1,472	-0,054	0,311	1,44E-04	0,18
r_u subcamada 3	0,615	0,677	1,459	-0,260	0,379	4,10E-03	5,20
r_u subcamada 4	0,548	0,603	1,462	-0,237	0,300	2,70E-03	3,43
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,445	-0,433	0,479	1,44E-02	18,29
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,427	-1,040	0,213	3,69E-02	46,83

Apêndice B – Análises probabilísticas – Método FOSM

Tabela B.1 – Análises em tensões totais

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Simplificado			% de V_{FS}
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m³)	20,0	22,0	1,221	-0,037	1,0	1,37E-03	5,67
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,331	0,009	155,0	1,17E-02	48,29
s_u subcamada 5 (kPa)	20,7	22,8	1,313	0,009	25	1,89E-03	7,84
s_u subcamada 6 (kPa)	22,9	25,2	1,339	0,019	25	9,23E-03	38,21
					FS	1,295	
					V [FS]	0,024	
					σ [FS]	0,155	
					β	1,898	
					PR(%)	2,88	
Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Corrigido			% de V_{FS}
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m³)	20,0	22,0	1,311	-0,040	1,0	1,60E-03	5,64
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,430	0,009	155,0	1,37E-02	48,23
s_u subcamada 5 (kPa)	20,7	22,8	1,410	0,009	25	2,11E-03	7,43
s_u subcamada 6 (kPa)	22,9	25,2	1,439	0,021	25	1,10E-02	38,70
					FS	1,391	
					V [FS]	0,028	
					σ [FS]	0,168	
					β	2,321	
					PR (%)	1,01	
Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Spencer			% de V_{FS}
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m³)	20,0	22,0	1,326	-0,043	1,0	1,81E-03	6,43
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,444	0,008	155,0	9,80E-03	40,57
s_u subcamada 5 (kPa)	20,7	22,8	1,432	0,010	25	2,58E-03	10,67
s_u subcamada 6 (kPa)	22,9	25,2	1,465	0,024	25	1,39E-02	57,55
					FS	1,411	
					V [FS]	0,028	
					σ [FS]	0,168	
					β	2,452	
					PR (%)	0,71	

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Morgenstern-Price			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\gamma_{\text{enrocamento sat}}$ (kN/m ³)	20,0	22,0	1,280	-0,040	1,0	1,56E-03	5,71
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	1,394	0,008	155,0	1,10E-02	45,64
s_u subcamada 5 (kPa)	20,7	22,8	1,379	0,010	25	2,34E-03	9,68
s_u subcamada 6 (kPa)	22,9	25,2	1,410	0,022	25	1,24E-02	51,33
					FS	1,359	
					V [FS]	0,027	
					σ [FS]	0,165	
					β	2,172	
					PR (%)	1,49	

Tabela B.2 – Análises em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 28,8^\circ$

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Simplificado			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	3,737	0,029	155,0	1,34E-01	20,52
ϕ'_{argila} (°)	28,8	31,636	3,952	0,117	10,56	1,45E-01	22,22
r_u subcamada 5	0,692	0,762	3,533	-1,184	0,077	1,08E-01	16,48
r_u subcamada 6	0,462	0,508	3,486	-2,795	0,034	2,66E-01	40,79
					FS	3,615	
					V [FS]	0,653	
					σ [FS]	0,808	
					β	3,236	
					PR (%)	0,06	

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Corrigido			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\phi'_{\text{enrocamento}}$ (°)	41,5	45,65	4,015	0,032	155,003	1,54E-01	20,46
ϕ'_{argila} (°)	28,8	31,636	4,246	0,126	10,563	1,67E-01	22,17
r_u subcamada 5	0,692	0,762	3,796	-1,271	0,077	1,24E-01	16,41
r_u subcamada 6	0,462	0,508	3,745	-3,012	0,034	3,09E-01	40,95
					FS	3,884	
					V [FS]	0,755	
					σ [FS]	0,869	
					β	3,319	
					PR (%)	0,045	

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	$\delta FS/\delta x$	Spencer		% de V_{FS}
					V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2.V[x]$	
ϕ' enrocamento (°)	41,5	45,65	4,481	0,027	155,003	1,09E-01	10,58
ϕ' argila (°)	28,8	31,636	4,825	0,158	10,563	2,63E-01	25,56
r _u subcamada 5	0,692	0,762	4,267	-1,502	0,077	1,73E-01	16,81
r _u subcamada 6	0,462	0,508	4,197	-3,770	0,034	4,84E-01	47,05
					FS	4,371	
					V [FS]	1,030	
					σ [FS]	1,015	
					β	3,322	
					PR (%)	0,045	
Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	$\delta FS/\delta x$	Morgenstern-Price		% de V_{FS}
					V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2.V[x]$	
ϕ' enrocamento (°)	41,5	45,65	4,130	0,028	155,003	1,25E-01	15,07
ϕ' argila (°)	28,8	31,636	4,401	0,135	10,563	1,93E-01	23,24
r _u subcamada 5	0,692	0,762	3,919	-1,343	0,077	1,38E-01	16,64
r _u subcamada 6	0,462	0,508	3,859	-3,315	0,034	3,75E-01	45,05
					FS	4,012	
					V [FS]	0,831	
					σ [FS]	0,912	
					β	3,303	
					PR (%)	0,048	

Tabela B.3 – Análises em tensões efetivas com $\phi'_{\text{argila}} = 8,5^\circ$

Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Simplificado			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\phi'_{\text{enrocamento}} (^\circ)$	41,5	45,65	1,419	0,006	155,00	6,08E-03	10,90
$\phi'_{\text{argila}} (^\circ)$	8,5	9,35	1,485	0,108	0,72	8,46E-03	15,17
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,366	-0,390	0,077	1,17E-02	20,90
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,350	-0,932	0,034	2,96E-02	53,02
					FS	1,393	
					V [FS]	0,056	
					σ [FS]	0,236	
					β	1,664	
					PR (%)	4,808	
Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Janbu Corrigido			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\phi'_{\text{enrocamento}} (^\circ)$	41,5	45,65	1,566	0,006	155,003	7,57E-03	12,15
$\phi'_{\text{argila}} (^\circ)$	8,5	9,35	1,649	0,125	0,723	9,80E-03	15,73
r_u subcamada 5	0,692	0,762	1,511	-0,462	0,077	1,25E-02	20,13
r_u subcamada 6	0,462	0,508	1,491	-1,127	0,034	3,24E-02	51,99
					FS	1,496	
					V [FS]	0,062	
					σ [FS]	0,250	
					β	1,987	
					PR (%)	2,346	
Variáveis aleatórias	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [$\bar{x} + \delta x$]	Spencer			
				$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V_{FS}
$\phi'_{\text{enrocamento}} (^\circ)$	41,5	45,65	4,481	0,027	155,003	4,76E-03	6,29
$\phi'_{\text{argila}} (^\circ)$	8,5	9,35	4,825	0,158	10,563	1,12E-02	14,85
r_u subcamada 5	0,692	0,762	4,267	-1,502	0,077	1,64E-02	21,66
r_u subcamada 6	0,462	0,508	4,197	-3,770	0,034	4,33E-02	57,19
					FS	1,543	
					V [FS]	0,076	
					σ [FS]	0,275	
					β	1,974	
					PR (%)	2,417	

Variáveis aleatórias	Morgenstern-Price						
	\bar{x}	$\bar{x} + \delta x$	FS [\bar{x} + δx]	$\delta FS/\delta x$	V [x]	$(\delta FS/\delta x)^2 \cdot V[x]$	% de V _{FS}
ϕ' enrocamento (°)	41,5	45,65	1,500	0,006	155,003	5,62E-03	8,43
ϕ' argila (°)	8,5	9,35	1,574	0,116	0,723	9,80E-03	14,70
r _u subcamada 5	0,692	0,762	1,445	-0,433	0,077	1,44E-02	21,59
r _u subcamada 6	0,462	0,508	1,427	-1,040	0,034	3,69E-02	55,28
					FS	1,475	
					V [FS]	0,067	
					σ [FS]	0,258	
					β	1,839	
					PR (%)	3,293	

Apêndice C – Análises probabilísticas – Método Estimativas Pontuais (EP)

Tabela C.1 – Análises em tensões totais (s_u em kPa)

Análise	$\gamma_{\text{sat enrocamento}}$	$\phi'_{\text{enrocamento}}$	su subcamada 5	su subcamada 6	Janbu Simplificado		Janbu Corrigido		Spencer		Morgenstern-Price	
					FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²
++++	21,0	53,95	25,7	27,9	1,512	2,286	1,625	2,641	1,642	2,696	1,584	2,509
---+	19,0	53,95	25,7	27,9	1,611	2,595	1,731	2,996	1,756	3,084	1,691	2,859
---+	19,0	29,05	25,7	27,9	1,356	1,839	1,457	2,123	1,529	2,338	1,450	2,103
---+	19,0	29,05	15,7	27,9	1,274	1,623	1,371	1,880	1,433	2,053	1,361	1,852
----	19,0	29,05	15,7	17,9	1,083	1,173	1,162	1,350	1,198	1,435	1,145	1,311
+++-	21,0	53,95	25,7	17,9	1,305	1,703	1,402	1,966	1,398	1,954	1,355	1,836
+++-	21,0	53,95	15,7	17,9	1,212	1,469	1,301	1,693	1,293	1,672	1,255	1,575
+---	21,0	29,05	15,7	17,9	1,022	1,044	1,096	1,201	1,127	1,270	1,078	1,162
+--+	21,0	29,05	25,7	17,9	1,100	1,210	1,181	1,395	1,217	1,481	1,163	1,353
+--+	21,0	29,05	15,7	27,9	1,202	1,445	1,291	1,667	1,346	1,812	1,286	1,654
+--+	21,0	29,05	25,7	27,9	1,277	1,631	1,374	1,888	1,433	2,053	1,369	1,874
++++	21,0	53,95	15,7	27,9	1,423	2,025	1,530	2,341	1,542	2,378	1,489	2,217
-+++	19,0	53,95	15,7	27,9	1,516	2,298	1,629	2,654	1,650	2,723	1,589	2,525
-++-	19,0	53,95	25,7	17,9	1,389	1,929	1,493	2,229	1,495	2,235	1,446	2,091
---+	19,0	29,05	25,7	17,9	1,168	1,364	1,252	1,568	1,296	1,680	1,236	1,528
-++-	19,0	53,95	15,7	17,9	1,291	1,667	1,387	1,924	1,383	1,913	1,340	1,796
					E[FS]	1,296	E[FS]	1,393	E[FS]	1,421	E[FS]	1,365
					E[FS ²]	1,706	E[FS ²]	1,970	E[FS ²]	2,049	E[FS ²]	1,890
					V[FS]	0,026	V[FS]	0,030	V[FS]	0,029	V[FS]	0,028
					σ [FS]	0,161	σ [FS]	0,174	σ [FS]	0,170	σ [FS]	0,166
					PR (%)	3,285	PR (%)	1,191	PR	0,665	PR	1,399
					β	1,840	β	2,260	β	2,476	β	2,198

Tabela C.2 – Análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila}=28,8^\circ$ (s_u em kPa)

Análise	γ sat enrocamento	ϕ' enrocamento	su subcamada 5	su subcamada 6	Janbu Simplificado		Janbu Corrigido		Spencer		Morgenstern-Price	
					FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²
++++	54,0	0,647	32,0	0,969	4,017	16,136	4,317	18,636	4,753	22,591	4,415	19,492
-+++	29,1	0,647	32,0	0,969	2,739	7,502	2,943	8,661	3,367	11,337	3,052	9,315
--++	29,1	0,277	32,0	0,969	3,865	14,938	4,153	17,247	4,929	24,295	4,416	19,501
---+	29,1	0,277	25,5	0,969	3,107	9,653	3,339	11,149	3,896	15,179	3,518	12,376
----	29,1	0,277	25,5	0,415	3,644	13,279	3,916	15,335	4,584	21,013	4,129	17,049
+++-	54,0	0,647	32,0	0,415	4,191	17,564	4,503	20,277	4,915	24,157	4,578	20,958
++--	54,0	0,647	25,5	0,415	3,446	11,875	3,702	13,705	3,987	15,896	3,740	13,988
+---	54,0	0,277	25,5	0,415	4,410	19,448	4,739	22,458	5,245	27,510	4,861	23,629
+-+-	54,0	0,277	32,0	0,415	5,405	29,214	5,808	33,733	6,548	42,876	6,007	36,084
++++	54,0	0,277	25,5	0,969	3,813	14,539	4,097	16,785	4,523	20,458	4,198	17,623
++++	54,0	0,277	32,0	0,969	4,652	21,641	4,998	24,980	5,596	31,315	5,161	26,636
++++	54,0	0,647	25,5	0,969	2,810	7,896	3,019	9,114	3,216	10,343	3,037	9,223
-+++	29,1	0,647	25,5	0,969	2,227	4,960	2,393	5,726	2,689	7,231	2,461	6,057
---+	29,1	0,647	32,0	0,415	3,447	11,882	3,703	13,712	4,268	18,216	3,854	14,853
--+-	29,1	0,277	32,0	0,415	4,557	20,766	4,897	23,981	5,820	33,872	5,207	27,113
+-++	29,1	0,647	25,5	0,415	2,782	7,740	2,989	8,934	3,393	11,512	3,088	9,536
					E[FS]	3,695	E[FS]	3,970	E[FS]	4,483	E[FS]	4,108
					E[FS ²]	14,315	E[FS ²]	16,527	E[FS ²]	21,113	E[FS ²]	17,715
					V[FS]	0,665	V[FS]	0,768	V[FS]	1,015	V[FS]	0,842
					σ [FS]	0,816	σ [FS]	0,877	σ [FS]	1,007	σ [FS]	0,918
					PR (%)	0,048	PR (%)	0,035	PR	0,027	PR	0,035
					β	3,304	β	3,388	β	3,458	β	3,387

Tabela C.3 – Análises em tensões efetivas com $\phi'_{argila}=8,5^\circ$ (s_u em kPa)

Análise	γ sat enrocamento	ϕ' enrocamento	su subcamada 5	su subcamada 6	Janbu Simplificado		Janbu Corrigido		Spencer		Morgenstern-Price	
					FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²	FS	FS ²
++++	54,0	0,647	32,0	0,969	1,408	1,982	1,512	2,286	1,541	2,375	1,481	2,193
---+	29,1	0,647	32,0	0,969	1,068	1,141	1,147	1,316	1,223	1,496	1,149	1,320
--++	29,1	0,277	32,0	0,969	1,417	2,008	1,522	2,316	1,675	2,806	1,552	2,409
---+	29,1	0,277	25,5	0,969	1,238	1,533	1,330	1,769	1,448	2,097	1,347	1,814
----	29,1	0,277	25,5	0,415	1,413	1,997	1,518	2,304	1,665	2,772	1,547	2,393
+++-	54,0	0,647	32,0	0,415	1,687	2,846	1,812	3,283	1,864	3,474	1,785	3,186
++--	54,0	0,647	25,5	0,415	1,486	2,208	1,596	2,547	1,630	2,657	1,566	2,452
+---	54,0	0,277	25,5	0,415	1,840	3,386	1,977	3,909	2,060	4,244	1,965	3,861
+-+-	54,0	0,277	32,0	0,415	2,100	4,410	2,257	5,094	2,372	5,626	2,253	5,076
++++	54,0	0,277	25,5	0,969	1,622	2,631	1,742	3,035	1,806	3,262	1,726	2,979
+++-	54,0	0,277	32,0	0,969	1,845	3,404	1,983	3,932	2,072	4,293	1,974	3,897
+++-	54,0	0,647	25,5	0,969	1,247	1,555	1,340	1,796	1,355	1,836	1,306	1,706
-++-	29,1	0,647	25,5	0,969	0,943	0,889	1,014	1,028	1,072	1,149	1,010	1,020
---+	29,1	0,647	32,0	0,415	1,289	1,662	1,385	1,918	1,494	2,232	1,393	1,940
--+-	29,1	0,277	32,0	0,415	1,626	2,644	1,747	3,052	1,933	3,736	1,780	3,168
+-+-	29,1	0,647	25,5	0,415	1,128	1,272	1,212	1,469	1,296	1,680	1,216	1,479
					E[FS]	1,460	E[FS]	1,568	E[FS]	1,657	E[FS]	1,566
					E[FS ²]	2,223	E[FS ²]	2,566	E[FS ²]	2,858	E[FS ²]	2,556
					V[FS]	0,092	V[FS]	0,106	V[FS]	0,114	V[FS]	0,105
					σ [FS]	0,303	σ [FS]	0,326	σ [FS]	0,338	σ [FS]	0,324
					PR (%)	6,464	PR (%)	4,050	PR	2,590	PR	4,025
					β	1,517	β	1,745	β	1,945	β	1,748