



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

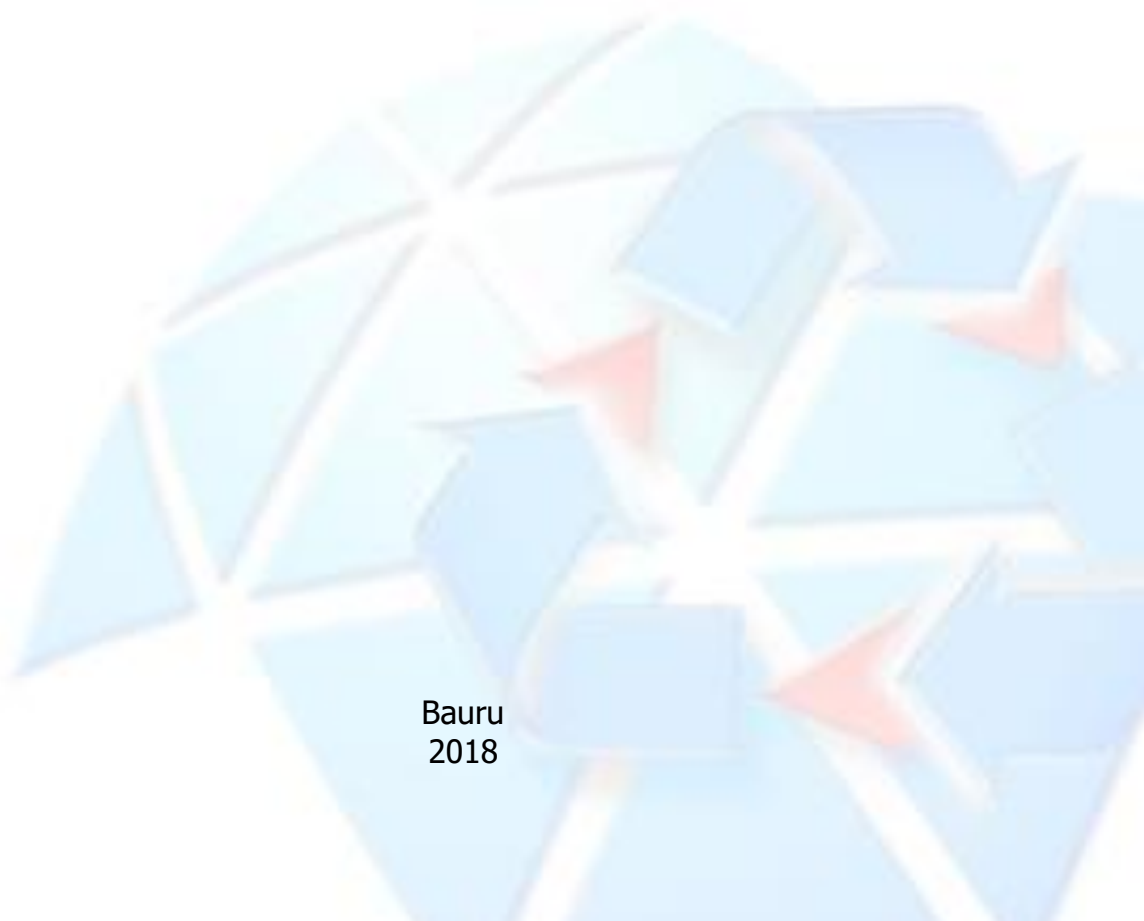
unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

ADMIR JOSÉ GIACON JUNIOR

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES
VIA TEORIA DA CONFIABILIDADE**



Bauru
2018

ADMIR JOSÉ GIACON JUNIOR

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES
VIA TEORIA DA CONFIABILIDADE**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Área de Concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Caio Gorla Nogueira

Bauru
2018



Giacon Junior, Admir José.

Análise probabilística da estabilidade de taludes
via teoria da confiabilidade / Admir José Giacon
Junior, 2018

86 f.

Orientador: Caio Gorla Nogueira

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Estabilidade de taludes. 2. Teoria da Confiabilidade. 3. Equilíbrio Limite. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ADMIR JOSÉ GIACON JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Sala de videoconferência do Departamento de Engenharia Elétrica, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. CAIO GORLA NOGUEIRA do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO CESAR LODI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JEFFERSON LINS DA SILVA do(a) Geotecnia / Escola de Engenharia de São Carlos - EESC - USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ADMIR JOSÉ GIACON JUNIOR, intitulada **ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES VIA TEORIA DA CONFIABILIDADE**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. CAIO GORLA NOGUEIRA



Prof. Dr. PAULO CESAR LODI



Prof. Dr. JEFFERSON LINS DA SILVA



Dedico esse trabalho a minha família, principalmente ao meu pai, Sr. Admir José Giacon (*in memoriam*), que ensinou os valores de um homem, honestidade, educação, humildade e ser temente a Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois, sem Ele nada seria possível, e só através Dele consegui vencer os desafios dessa caminhada.

Agradeço aos meus pais Maria Raquel de Camargo Giacon e Admir José Giacon (*in memoriam*), meu irmão Cleyton Murilo Giacon e minha namorada Bianca Teixeira Morelli, que ao longo dessa caminhada sempre me apoiaram, me incentivando em momentos difíceis, demonstrando amor e compreensão. Eles que por muitas vezes compartilharam da minha ausência, mas nunca se ausentaram. E sempre foram meu porto seguro e minha estrutura. Agradeço por sonharem os meus sonhos.

Agradeço, em especial, ao professor Caio Gorla Nogueira, que me deu a oportunidade do conhecimento, por poder contar como orientador e como amigo. Obrigado por sua competência, seriedade, confiança e por sempre ser capaz de simplificar o complicado. Levarei seus ensinamentos e conselhos por toda vida.

Agradeço ao Professor Roger Augusto Rodrigues, o qual abriu as portas da universidade desde o primeiro contato, sempre solícito e amigo. Agradeço ainda os Professores Heraldo Luiz Giacheti e Paulo Cesar Lodi pela amizade, prontidão, dedicação, profissionalismo, atenção e empenho.

Sou grato a todos os professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental, que com essa profissão tão honrada transmitiram seus conhecimentos e sabedorias, com muita paciência e dedicação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro que tornou possível a minha dedicação exclusiva a este projeto de pesquisa.

Agradeço ao companheiro de pesquisa Higor Biondo de Assis pela parceria bem sucedida e, acima, de tudo pela amizade.

Agradeço ainda aos amigos da Sala de Pesquisa da Pós-Graduação: Breno, Roberto, Alfredo, Amanda, Isabela, Silas, Heber e Jeferson pela amizade, colaboração e incentivo fornecidos.

Aos funcionários da Seção Técnica de Pós-Graduação pelo profissionalismo, prontidão e cordialidade durante o período de minha estadia no curso de mestrado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse concluído com zelo e dedicação.

“Há os que se queixam do vento. Os que esperam que ele mude. E os que procuram ajustar as velas.”

(William G. Ward)

RESUMO

GIACON JUNIOR, A. J. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade**. 86f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

Devido às consequências negativas associadas à ruptura e deslizamentos de taludes, a análise de estabilidade desses assume uma parte primordial na área da engenharia geotécnica. A maioria dessas análises é realizada de maneira determinística, não incorporando as incertezas inerentes ao sistema. A constatação dessas incertezas em projetos de taludes associa-se a previsão de uma probabilidade de falha no desempenho de taludes quanto à segurança. Nesse contexto, esta dissertação busca avaliar a segurança de taludes através de uma abordagem probabilística, simulando taludes com geometrias e solos variados, verificando ainda a influência da elevação da posição do nível d'água. Para essa finalidade foram realizadas análises probabilísticas utilizando *First Order Reliability Method* (FORM) com base nos métodos de Equilíbrio Limite, através dos programas computacionais acadêmicos RASS (análises determinísticas) e RELgen (análises probabilísticas). Com base nos resultados, verificou-se que as superfícies críticas obtidas pelos métodos determinísticos podem não coincidir com as superfícies que apresentam a maior probabilidade de falha. Isto é verificado ainda na análise de inclinação da superfície do talude, em que inclinações apresentando fatores de segurança admissíveis, apresentaram probabilidades de falha não aceitáveis. Estas divergências são atribuídas às incertezas inerentes ao sistema. Sendo assim, as análises de estabilidade de talude baseadas apenas nos resultados de análises determinísticas não apresentam todas as variáveis presentes no contexto do projeto. Por fim, através dos resultados obtidos nesta pesquisa é possível inferir que a adoção da análise probabilística em projeto de taludes auxilia de uma forma consistente a avaliação da segurança dos taludes, contribuindo de maneira satisfatória na prática de projetos de engenharia geotécnica.

PALAVRAS CHAVE: Estabilidade de Taludes; Teoria da Confiabilidade; Equilíbrio Limite.

ABSTRACT

GIACON JUNIOR, A. J. **Probabilistic analysis of slope stability by reliability theory.** 86f. Dissertation (Master degree) – Faculty of Engineering of Bauru, Paulista State University, Bauru, 2018.

Due to the negative consequences associated with slope rupture and landslides, the stability analysis of these slopes plays an important role in geotechnical engineering. Most of these analyzes are carried out in a deterministic manner, not incorporating the uncertainties inherent to the system. The observation of these uncertainties in slope projects is associated with the forecast of a probability of failure in slope performance in terms of safety. In this context, this paper present research seeks to evaluate slope safety in a probabilistic manner, simulating slopes with varied geometries and soils, also verifying the influence of elevation of the water level position. For this purpose, were performed probabilistic analyzes using First Order Reliability Method (FORM), based on the Limit Equilibrium methods, RASS (deterministic analysis) and RELgen (probabilistic analyzes). Based on the results, it was found that the critical surfaces obtained by the deterministic methods may not coincide with the highest most probability surfaces to fail. This is still verified in surface slope analysis, where inclinations with acceptable safety factors presented probabilities of failure unacceptable. These divergences are attributed to the uncertainties inherent in the system. Therefore, slope stability analyzes based only on the results of deterministic analyzes do not present all the variables present in the project context. Finally, through the results obtained in this research it is possible to infer that the adoption of probabilistic analysis in slope design assists in a consistent way the assessment of slope safety, contributing in a satisfactory way in the practice of geotechnical engineering projects.

KEYWORDS: Slope stability; Reliability Theory; Limit Equilibrium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Determinação das tensões em um plano genérico, por meio do círculo de Mohr.	14
Figura 2.2 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no plano.	15
Figura 2.3 – Fontes de erros ou incertezas dos parâmetros nas estimativas de propriedade do solo.	19
Figura 2.4 – Funções de distribuições de densidade e acumulativa de probabilidade e de variáveis aleatórias discreta e contínuas.	21
Figura 2.5 – Gráfico de uma distribuição de probabilidades normal e log-normal.	22
Figura 2.6 – Regiões segura e de falha no espaço físico das variáveis aleatórias.	25
Figura 2.7 – Definição do índice de confiabilidade no espaço normal-padrão.	27
Figura 2.8 – Transformação do espaço físico correlacionado para o espaço normal-padrão sem correlação.	29
Figura 3.1– Fluxograma da metodologia.	38
Figura 3.2 – Interface de entrada de dados do programa RASS.	40
Figura 3.3 – Interface de saída de dados do programa RASS.	40
Figura 3.4 – Interface de entrada de dados do programa RELgen.	41
Figura 3.5 – Interface de saída de dados do programa RELgen.	42
Figura 3.6 – Talude adotado para as análises de superfície crítica.	45
Figura 3.7 – Inclinação assumida para verificação de influência da geometria do talude. .	50
Figura 3.8 – Talude idealizado para as análises de superfície crítica.	51
Figura 4.1 – Análise da superfície crítica: Solo arenoso.	53
Figura 4.2 – Análise da superfície crítica: Solo argiloso.	54
Figura 4.3 – Análise da superfície crítica: Solo misto.	54
Figura 4.4 – Influência das variáveis aleatórias: Solo arenoso.	56
Figura 4.5 – Influência das variáveis aleatórias: Solo argiloso.	56
Figura 4.6 – Influência das variáveis aleatórias: Solo misto.	57
Figura 4.7 – Fator de segurança da superfície crítica.	58
Figura 4.8 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo arenoso.	59
Figura 4.9 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo arenoso.	59
Figura 4.10 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo argiloso.	60

Figura 4.11 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo argiloso.	60
Figura 4.12 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo misto.	61
Figura 4.13 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo misto.	61
Figura 4.14 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo arenoso.....	63
Figura 4.15 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo argiloso.	63
Figura 4.16 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo misto.	64
Figura 4.17 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo arenoso.	64
Figura 4.18 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo argiloso.	64
Figura 4.19 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo misto.	65
Figura 4.20 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo arenoso.	66
Figura 4.21 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo argiloso.	66
Figura 4.22 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo misto.	67
Figura 4.23 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo arenoso.	68
Figura 4.24 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo argiloso.	68
Figura 4.25 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo misto.	69
Figura 4.26 – Análise da influência da elevação do nível d'água.	70
Figura 4.27 – Análise de elevação do nível d'água: Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança.	70
Figura 4.28 – Influência das variáveis aleatórias em função da elevação do nível d'água: Fellenius.	71

Figura 4.29 – Influência das variáveis aleatórias em função da elevação do nível d’água: Bishop Simplificado.	71
Figura A.1 – Método de Janbu Simplificado: Fator de correção.	82
Figura A.2 – Método de Janbu Simplificado: Profundidade e comprimento da superfície de ruptura.....	83
Figura A.3 – Método de Janbu Generalizado: Implementação do fator de correção.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais métodos de equilíbrio limite.	17
Tabela 2.2 – Valores de índice de confiabilidade e probabilidade de falha alvo de acordo com o nível de desempenho esperado.	27
Tabela 3.1 – Classificação estatísticas do solo assumidos para análises de determinação da superfície crítica, influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias e inclinação da superfície do talude.	43
Tabela 3.2 – Classificação estatísticas do solo adotado para análise de determinação da influência da elevação do nível d’água.	44
Tabela 3.3 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo arenoso. .	46
Tabela 3.4 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo argiloso. .	46
Tabela 3.5 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo misto.	46
Tabela 3.6 – Dados do coeficiente de variação assumido para as variáveis aleatórias.	47
Tabela 3.7 – Inclinação assumida para verificação de influência da geometria do talude. .	48
Tabela 3.8 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo arenoso.	48
Tabela 3.9 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo predominantemente argiloso.	49
Tabela 3.10 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo misto.	49
Tabela 3.11 – Superfície adotada para análise de elevação do nível d’ água.	51
Tabela 4.1 – Resultados de segurança do talude para as análises determinísticas e probabilísticas.	55
Tabela 4.2 – Análise de inclinação: Índice de confiabilidade e coordenadas da superfície crítica.	67

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS.....	VI
SUMÁRIO.....	VII
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 <i>Objetivos Gerais</i>	10
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	10
1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	13
2.1.1 <i>Conceitos de Mecânica dos Solos Aplicados à Estabilidade de Taludes</i>	13
2.1.2 <i>Descrição dos Métodos de Equilíbrio Limite</i>	16
2.2 TEORIA DA CONFIABILIDADE	17
2.2.1 <i>Incertezas na Geotecnia</i>	18
2.2.2 <i>Análise Estatística de Dados</i>	20
2.2.3 <i>Distribuições de Probabilidade Aplicadas na Geotecnia</i>	22
2.2.4 <i>Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Falha</i>	24
2.2.5 <i>Métodos de Solução</i>	28
2.3 PESQUISAS CIENTÍFICAS ENVOLVENDO CONFIABILIDADE.....	29
2.3.1 <i>Considerações a Respeito da Revisão Bibliográfica</i>	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 ADOÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE	38
3.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL ACOPLADO	39
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	42
3.4 ANÁLISES REALIZADAS	44
3.4.1 <i>Análise de Superfície Crítica do Talude</i>	45
3.4.2 <i>Análise da Influência do Coeficiente de Variação das Variáveis Aleatórias</i>	47
3.4.3 <i>Análise da Influência da Inclinação da Superfície do Talude</i>	47
3.4.4 <i>Análise da Influência da Posição do Nível d'Água no Talude</i>	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53

4.1 ANÁLISE DE SUPERFÍCIE CRÍTICA DO TALUDE	53
4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	63
4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE DO TALUDE	65
4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA NO TALUDE	70
5 CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXO A – MÉTODO DE JANBU SIMPLIFICADO E GENERALIZADO	81

1 INTRODUÇÃO

De um modo geral, as concepções de projetos de taludes se baseiam em resultados fornecidos por análises determinísticas. Os métodos com respostas determinísticas mais usuais são fundamentados na Teoria de Equilíbrio Limite. Essa teoria consiste na consideração de uma superfície crítica de ruptura, que o balanço da somatória dos esforços resistentes e solicitantes fornece um valor adimensional de Fator de Segurança (FS).

Embora vários destes métodos de avaliação sejam consagrados na literatura (Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, etc.), a consideração consistente das incertezas inerentes ao sistema, como a variabilidade dos parâmetros e características no comportamento global dos taludes ainda não são realizadas de forma adequada. Na Geotecnia as três principais fontes de incertezas são variabilidade inerente ao solo, erro de medição e incerteza de transformação (PHOON; KULHAWY, 1999).

A previsão do desempenho de taludes quanto à segurança são dominadas pelas incertezas. Estas podem ser associadas às propriedades dos solos, configuração geológica, condições ambientais, carregamentos, abalos sísmicos dentre outros fatores. A constatação dessas incertezas em projetos de taludes associa-se a uma probabilidade de falha, ou seja, uma chance matemática de insucesso (EL-RAMLY, 2001).

Exemplificando isso, cita-se o caso do rompimento da barragem de rejeitos Fundão no município de Mariana-MG. Neste caso, as análises determinísticas de estabilidade apresentavam resultados de FS com valor de 1,68 (em 2015), para a seção considerada mais crítica. Porém, mesmo este valor apresentando acima do preconizado pela NBR 13.028/2017, que é de 1,50, a barragem veio a colapso, liberando mais de 34 Mm³ de rejeitos. Como consequência, contabilizou a morte de 19 pessoas (1 pessoa se encontra desaparecida) e, impactos negativos sociais e ambientais incalculáveis (BRASIL, 2016). Visto os resultados das análises determinísticas, a ruptura da barragem Fundão pode ser associada às incertezas inerentes ao sistema.

É neste contexto que a Teoria da Confiabilidade pode fornecer subsídios importantes para a avaliação da segurança global de taludes, pois, trata de forma mais consistente as incertezas inerentes aos sistemas, bem como tem condições de avaliar a sensibilidade e relevância desses parâmetros na segurança dos taludes.

Fundamentado nessa importância, este trabalho, por meio dos programas computacionais **RASS** e **RELgen**, avaliou a estabilidade de taludes de forma

determinística e probabilística. Os taludes foram idealizados com variadas geometrias e solos, as análises consideraram ainda a influência da posição do nível d'água (sem ocorrência de fluxo). As avaliações da segurança dos taludes de forma determinística consideraram os métodos da Teoria de Equilíbrio Limite. Posteriormente, esses métodos foram assumidos para realizações das análises probabilísticas de estabilidade de taludes através da Teoria da Confiabilidade via *First Order Reliability Method* (FORM).

As características físicas e estatísticas dos solos assumidos nas análises são tomadas com base em dados da literatura e, portanto, nenhum ensaio de laboratório foi realizado para quantificação dos parâmetros de resistência. As propostas dessas análises são a comparação entre os resultados obtidos de modo determinístico e probabilístico, relacionado à superfície crítica, influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias, domínio da inclinação da superfície do talude quanto à segurança de projeto e verificação da interferência da posição do nível d'água na estabilidade do talude.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo geral analisar a estabilidade de taludes, a partir de uma abordagem probabilística via Teoria da Confiabilidade, e com os resultados realizar comparação com a abordagem clássica determinística do fator de segurança.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para a realização da proposta do trabalho, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar por meio do fator de segurança a estabilidade de taludes a partir dos métodos determinísticos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Janbu Generalizado;
- b) Avaliar a estabilidade de taludes considerando uma abordagem probabilística via Teoria da Confiabilidade para os métodos de equilíbrio limite anteriores e comparar o seu desempenho com os resultados da análise determinística convencional. Isso será feito, inicialmente, comparando se há ou não coincidência (superposição) entre superfícies críticas obtidas em ambas às análises;

- c) Avaliar a influência do coeficiente de variação dos parâmetros físicos de resistência do solo assumidos como variáveis aleatórias. Isso significa mapear a influência da incerteza estatística sobre o comportamento dos taludes. A avaliação será realizada através de análises probabilísticas com base nos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado;
- d) Avaliar a influência da inclinação da superfície do talude na estabilidade do mesmo considerando novamente as abordagens, isto é, determinística e probabilística, ambas com base nos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado;
- e) Verificar a interferência da cota do nível d'água na segurança do talude, esta análise será realizada através dos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado.

1.2 Escopo da Dissertação

A dissertação é desenvolvida em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentada a introdução ao tema, demonstrando a sua relevância, justificando sua escolha e explicitando os objetivos do trabalho, além de demonstrar sua organização.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, em uma primeira etapa, apresenta os conceitos de Mecânica dos Solos aplicados à estabilidade de taludes. Com base nesta etapa, as formulações do método de Janbu (simplificado e generalizado) são demonstradas no Anexo A. A segunda etapa da revisão bibliográfica se evidencia os conceitos da Teoria da Confiabilidade.

Na sequência, o terceiro capítulo explica os procedimentos tomados e os métodos das análises realizadas até o momento para esta dissertação.

Os resultados obtidos através das análises referenciadas na metodologia são observados no quarto capítulo. E, finalizando o corpo principal do trabalho, o quinto capítulo reúne as conclusões obtidas em função de dados científicos e das análises realizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de Equilíbrio Limite

O risco associado às rupturas de taludes, em termos de vidas humanas e bens materiais, torna a análise de estabilidade de taludes um assunto de elevada importância na Geotecnia. Deste modo, métodos foram desenvolvidos no intuito de avaliar a segurança dos taludes, ou seja, a resistência do talude quanto à ruptura, denominada, estabilidade.

Os métodos com base na Teoria do Equilíbrio Limite definem a estabilidade de um talude somente nas considerações dos equilíbrios das forças resistentes pelas forças solicitantes. Visto isso, neste capítulo, são apresentados conceitos básicos de Mecânica dos Solos aplicados à estabilidade de taludes, elucidando os princípios fundamentais deste trabalho.

2.1.1 Conceitos de Mecânica dos Solos Aplicados à Estabilidade de Taludes

O estudo sobre estabilidades de taludes é um assunto complexo e de ampla discussão na engenharia geotécnica. Uma das características que remete a essa complexidade é o fato de que o talude pode ser constituído de rochas, massas de solo ou ambos.

Outra questão importante na análise da estabilidade de taludes é a compreensão das tensões atuantes e os mecanismos de resistência, onde uma massa de solo, em qualquer ponto de seu interior está sujeito a esforços. Isso acontece em razão de seu peso próprio e de outros fatores que possam estar gerando forças solicitantes (DAS, 2011).

A tensão total divide-se em duas parcelas: a tensão efetiva (σ') transmitida pelo contato entre as partículas e a pressão d'água. Esta tensão é denominada de valor de pressão d'água intersticial no poro do solo, comumente chamada de pressão neutra (u). Os efeitos de compressão, distorção e resistência ao cisalhamento correspondem unicamente à variação de tensão efetiva nos solos (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Diferentemente do valor de pressão neutra, que exerce uma pressão uniforme em todas as direções, as partículas do solo em plano distinto no subsolo sofrem tensões as quais, muitas vezes, não são normais ao plano. Essas tensões podem ser decompostas de forma simplificada em forças normais e tangenciais. A somatória das componentes normais ao plano, dividida pelo total de área que corresponde as partículas no ponto que os contatos incidem, é referida como tensão normal (σ_α). É definida como tensão cisalhante

(τ_α) a somatória das componentes das forças tangenciais, dividida pela área (GERSCOVICH, 2012).

Segundo Pinto (2006), sempre existirá tensão normal atuando em três planos, deixando assim de existir, então, a tensão cisalhante. Estes planos são ortogonais entre si, os quais juntos às tensões atuantes são denominados de principais. Deste modo, a maior tensão principal é referida como σ_1 , a menor de σ_3 e a intermediária de σ_2 .

A análise das tensões pode ser representada graficamente pelo denominado círculo de Mohr (HIBBELER, 2010), conforme representado na Figura 2.1.

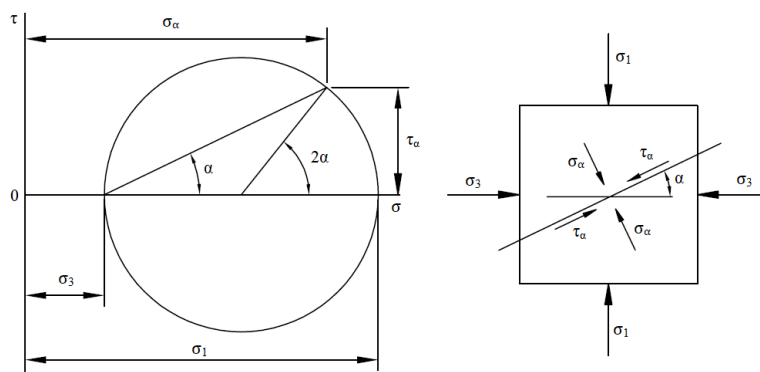


Figura 2.1 – Determinação das tensões em um plano genérico, por meio do círculo de Mohr.

Fonte: Adaptado de DAS, 2011.

Com o intuito de estabelecer critérios de ruptura do solo são estabelecidas formulações que refletem esse processo. Alguns modelos adotam as máximas tensões mobilizadas pelo solo, enquanto outros abordam a máxima deformação e valores limites de energia de deformação.

O critério de ruptura que melhor define esse comportamento do solo é o de Mohr-Coulomb, o qual determina que o cisalhamento do solo ocorra quando as tensões atuantes no plano atingem as envoltórias dos círculos de Mohr. O critério de resistência é estabelecido por Coulomb pela Equação (2.1), que correlaciona em sua formulação os parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (φ) (LAMBE; WHITMAN, 1969).

A coesão é definida como a resistência do solo proporcionada através da relação físico-química exercida entre as partículas que compõem a massa do solo (GERSCOVICH, 2012). A coesão pode variar de valor de acordo com o tipo de solo, em solos granulares a coesão apresentada refere-se a uma mínima parcela vista a resistência demonstrada pelo atrito entre as partículas, porém, em solos finos, evoluídos pedologicamente, o valor de coesão se mostra de forma significativa. O ângulo de atrito apresentado entre as partículas

do solo é descrito como o ângulo máximo que a força difundida pelo corpo a superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra o movimento (PINTO, 2006).

$$\tau = c' + \sigma \times \tan \phi' \quad (2.1)$$

A resistência ao cisalhamento necessária para a ruptura do solo é definida através da somatória do parâmetro de coesão com a tensão atuante no plano multiplicado pela tangente do ângulo de atrito apresentado pelo solo. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb lineariza as envoltórias de tensões, definido a envoltória como uma reta, como ilustrado na Figura 2.2.

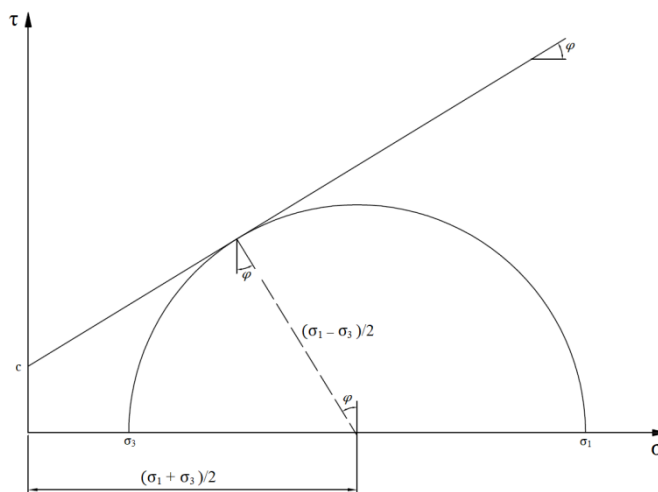


Figura 2.2 – Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no plano.

O traçado da reta formado pelos parâmetros de coesão e ângulo de atrito indica um estado de tensão na ruptura no momento em que tangencia a envoltória de resistência.

Aplicando os conceitos básicos com o intuito de avaliar a possibilidade de ruptura e escorregamento de massas de solo é possível definir os métodos para análise da estabilidade de taludes. Basicamente, na Mecânica dos Solos tradicional, esses métodos podem ser divididos em conjuntos de análises determinísticas e análises probabilísticas (FERREIRA, 2013).

Os métodos com base nas análises determinísticas têm como base de seu equacionamento os parâmetros geotécnicos e característica do talude. Destaca-se deste conjunto de análise os seguintes métodos: - Método do Equilíbrio Limite; - Método das Análises Limite; - Método Tensão-Deformação (FERNANDES, 2016b). Já o conjunto de análise de estabilidade de taludes com base nas análises probabilísticas tem como características adotar os parâmetros do solo sendo variáveis aleatórias.

No Brasil, a análise de estabilidade de taludes é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR 11682 de 2009, Estabilidade de encostas. Esta norma apresenta os requisitos mínimos para elaboração de estudos, projetos, execução, controle e observação de obras de estabilização (NBR 11682, 2009).

2.1.2 Descrição dos Métodos de Equilíbrio Limite

Os métodos com base na teoria de equilíbrio limite consistem em estimar o equilíbrio da massa de solo presente no talude na iminência de um processo de escorregamento. Visto que a ruptura pode se apresentar de forma plana, poligonal, circular ou mista, podendo ocorrer acima ou abaixo do pé do talude (SILVA, 2013).

Os Métodos de Equilíbrio Limite utilizam-se, geralmente, do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A condição de estabilidade do talude deste tipo de método basicamente baseia-se que as forças de cisalhamento atuantes devem ser menores que as forças resistentes. Quando essas forças são comparadas, fornecem como resultado o fator de segurança, o qual, no Brasil, tem o valor mínimo regulamentado pela NBR 11682 de 2009. O fator de segurança desejado é estabelecido conforme o nível de segurança esperado contra danos materiais e contra perda de vidas humanas.

Segundo Massad (2010), para análise de estabilidade de taludes, os métodos de equilíbrio limite partem dos seguintes pressupostos:

- Considera-se o solo como tendo o comportamento rígido-plástico, o qual demonstra a característica de rompimento brusco, não apresentando deformações significativas antes da ruptura;
- A abordagem através das equações de equilíbrio estáticas é válida até a iminência da ruptura do talude, visto que o processo é dinâmico;
- O fator de segurança é constante ao longo da linha da ruptura, ignorando a progressividade da ruptura e demais fenômenos isolados.

Dentre os inúmeros métodos com base na teoria de equilíbrio limite, destaca-se os métodos elencados na Tabela 2.1, sendo possível visualizar ainda o ano de apresentação e o tipo de superfície de ruptura analisado.

Tabela 2.1 – Principais métodos de equilíbrio limite.

MÉTODOS	ANO DE APRESENTAÇÃO	SUPERFÍCIE DE RUPTURA
Fellenius	1936	Circular
Janbu (rigoroso)	1954	Qualquer
Bishop Simplificado	1955	Circular
Morgenstern-Price	1965	Qualquer

Fonte: Adaptado de Ferreira, 2013.

A partir da Tabela 2.1 é possível observar que alguns procedimentos independem do tipo da superfície de ruptura, o que demonstra ser uma vantagem na utilização desses métodos específicos. Porém, os métodos de equilíbrio limite apresentam resultados satisfatórios quando aplicados em solos homogêneos. No entanto, quando a análise ocorre em taludes constituídos de camadas de solos diferentes, a aplicação se torna complexa e o resultado gerado pode não ser aceitável (SILVA, 2012).

Visto a fração limitada da literatura que fazem menção ao método de Janbu e, com o intuito de exemplificar o referido método no Anexo A, encontra-se o método de Janbu em sua forma simplificada e generalizada.

Ainda no Anexo A, é descrita a implementação para cálculo automático do fator de correção (f_o) (utilizado pelo método de Janbu Generalizado) em uma planilha eletrônica, em casos que o talude apresente uma superfície de ruptura de forma cilíndrica.

2.2 Teoria da Confiabilidade

A variabilidade geotécnica é um atributo complexo, resultado de fontes distintas de incertezas, em geral, as propriedades mecânicas e físicas de rochas e solos apresentam-se naturalmente dispersas, soma-se a essa, as incertezas nos modelos de transformações e as incertezas quanto ao erro humano (PHOON; KULHAWY, 1999).

A variabilidade do solo afeta sistematicamente ou aleatoriamente análises de estabilidade de taludes. Sendo assim, a relevância da questão da segurança, ocasionou a inserção de ferramentas que permitam análises com base nas incertezas apresentadas tanto na aquisição de dados, quanto as incertezas dos materiais.

O uso da probabilidade permite ajudar no tratamento dos dados contendo incertezas. Comumente, as análises com base nos métodos probabilísticos fornecem como

resultado a probabilidade de falha (P_f) do sistema analisado, com isso, obtém-se o grau ou índice de confiabilidade (β).

Visto isto, neste capítulo, são detalhados os conceitos básicos da probabilidade, tais como os descritos por Ang e Tang (1975). E, concluindo este capítulo, são listados alguns trabalhos relacionados ao tema da presente dissertação, com o intuito de demonstrar a relevância do assunto abordado no contexto científico mundial atual.

2.2.1 Incertezas na Geotecnia

Na Geotecnia, a incerteza está inserida em todas as fases de um projeto, desde a caracterização do local de análise até o projeto proposto para tomadas de decisões. A influência da incerteza na avaliação da segurança pode ser significativa e refletida em falhas em sistemas destinados a serem seguros.

Com isso, há uma tendência crescente de gerenciar os riscos apresentados em um projeto. Na área geotécnica a confiabilidade mostra-se como uma alternativa de ferramenta para avaliação e gerenciamento dessas incertezas (EL-RAMLY, 2001). Porém, para que haja eficiência desta ferramenta, são necessárias compreensão e quantificação adequadas das incertezas.

A classificação das incertezas pode variar de acordo com os critérios adotados por distintos autores. Morgenstern (1995), Phoon e Kulhawy (1999) e El-Ramly (2001) propõem a divisão das incertezas em três categorias, sendo elas:

- Incertezas dos parâmetros: dizem respeito às propriedades físicas, químicas e mecânicas que caracterizam o objeto de estudo. Na área geotécnica essas incertezas podem ser correlacionadas aos parâmetros de resistência e compressibilidade que determinado solo apresenta (EL-RAMLY, 2001);
- Incertezas nos modelos: está relacionada à inexatidão entre a teoria adotada nos modelos matemáticos com a realidade. Os modelos analíticos, geralmente, são caracterizados por hipóteses e aproximações simplificadas. A incerteza apresentada por modelos representa a maior parte das incertezas nos sistemas geotécnicos (MORGENSTERN, 1995);
- Incertezas humanas: são vinculadas ao erro humano, tem como base na maioria das vezes a falta de conhecimento técnico, domínio dos procedimentos e deficiência de informação. Estes erros são aleatórios e

imprevisíveis, mostrando-se de difícil quantificação. Deste modo, Flores (2008) afirma que estas incertezas são geralmente desprezadas na prática.

Quanto às incertezas dos parâmetros, Baecher (1987) as atribui a duas fontes: sendo elas dispersão dos dados e erro sistemático. A dispersão, que ocorre em torno da média, pode ser dividida em variabilidade espacial e erros aleatórios. Os erros sistemáticos são referentes ao desvio na tendência da medida quanto à verdadeira tendência desconhecida, esses erros são subdivididos em duas categoriais: - Erro estatístico; - Desvio (“*bias*”) nas medidas. Esta classificação das incertezas dos parâmetros pode ser observada na Figura 2.3.

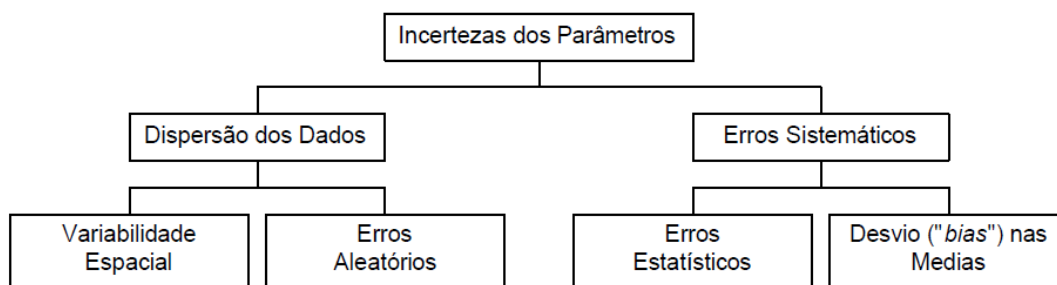


Figura 2.3 – Fontes de erros ou incertezas dos parâmetros nas estimativas de propriedade do solo.

Fonte: Adaptado de Baecher (1987).

As fontes de incertezas dos parâmetros relacionados à variabilidade espacial referem-se às variações das propriedades dos solos em diferentes pontos pertencentes a uma mesma área, inclusive em regiões homogêneas de solo. Essa variação é atribuída a fatores de composição mineralógica, forma de intemperismo e histórico de tensões que atuaram na formação do solo (LACASSE; NADIM, 1997). A variabilidade espacial não é um processo aleatório, existe uma correlação da propriedade do solo com a localização no espaço. Essa correlação deverá diminuir à medida que a distância entre os pontos aumenta. A variabilidade espacial é inerente ao solo e não pode ser reduzida, deste modo, deve ser considerada em qualquer análise geotécnica (EL-RAMLY, 2001).

Os erros aleatórios referem-se aos erros originados nos ensaios de campo ou de laboratório para caracterização do solo. Isto devido às deficiências de equipamentos que não apresentam padrão de repetitividade. Uma forma de minimizar este tipo de erro é realizando uma série de ensaios, respeitando os métodos dos ensaios de acordo com suas

respectivas normas. Este procedimento tende minimizar os erros associados à reprodutibilidade do operador (FLORES, 2008).

Os erros estatísticos como fonte de incertezas dos parâmetros ocorrem devido ao número de análises realizadas para determinação dos parâmetros. Visto que, o cálculo estatístico se utiliza da média como dado de entrada, uma quantidade baixa de elementos pode fornecer uma média que não represente de fato a população analisada (EL-RAMLAY, 2001). Esse erro ocorre em função da estimação da média, que por causa da limitação de dados, a média representada da população pode não ser a mesma (FLORES, 2008).

O desvio (“*bias*”) nas medidas é um erro relacionado à tendência dos valores dos parâmetros serem subestimados e superestimados. Na Geotecnia, isso pode ocorrer pelo uso inadequado do equipamento, perturbação do solo ou utilização inapropriada de modelos ou correlações para interpretação das medidas (BAECHER, 1987).

2.2.2 Análise Estatística de Dados

As incertezas presentes nos parâmetros das análises de sistemas geotécnicos podem ser apresentadas como variáveis aleatórias, já que essas são usadas para representar um conjunto de possíveis eventos. Além disso, uma vez que a maioria dos problemas geotécnicos é expressa em termos de quantidades numéricas, as variáveis aleatórias são particularmente apropriadas (FENTON; GRIFFITHS, 2008).

De acordo com Ang e Tang (1975), as variáveis aleatórias podem ser consideradas como uma função que fornece um evento em um espaço amostral para a reta dos números reais.

Segundo Nogueira (2010), o resultado de experimento pode ser representado por uma variável aleatória através de um valor, visto isto, associa-se este resultado a uma probabilidade de ocorrência. A regra que determina todas as medidas de probabilidades associadas a todos os valores possíveis de variáveis aleatórias é chamada de distribuição de propriedades.

A representação de variáveis aleatórias do tipo discreta, contínua e mista pode ser realizada pela função de distribuição acumulada de probabilidade (FDA). A função densidade de probabilidade (FDP) pode ser considerada a derivada em relação a x de função de distribuição acumulada de probabilidade.

A Figura 2.4 demonstra as funções de distribuições de densidade e acumulativa de probabilidade de variáveis aleatórias dos tipos discreta e contínua.

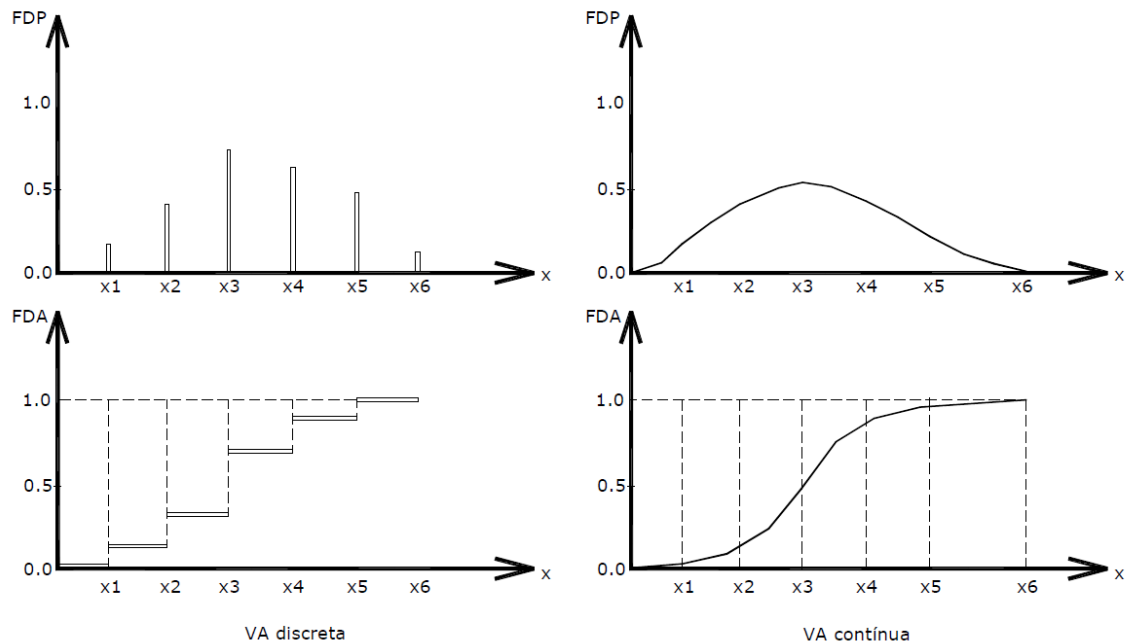


Figura 2.4 – Funções de distribuições de densidade e acumulativa de probabilidade e de variáveis aleatórias discreta e contínuas.

Fonte: Nogueira (2010), pág. 170.

Se a distribuição de probabilidades for especificada, a variável aleatória é completamente descrita. As medidas mais comuns para descrever as variáveis aleatórias utilizadas na área da probabilidade são:

- Tendência central, média (μ) ou valor esperado: representa o centro de gravidade da “massa” de distribuição de probabilidades da variável.
- Variabilidade central ou variância (ξ^2): é uma medida de dispersão dos valores da variável aleatória em torno da média.
- Desvio-padrão (ξ): fornece a variabilidade de uma quantidade aleatória, o ξ é dado pela raiz quadrada da variância.
- Coeficiente de variação, $CV(X)$, é uma medida adimensional da dispersão da variável aleatória em torno da média.

Valores altos de coeficiente de variação refletem alta dispersão dos resultados em torno da média, enquanto baixos valores de coeficiente de variação indicam pouca dispersão.

2.2.3 Distribuições de Probabilidade Aplicadas na Geotecnia

Histogramas e distribuições de probabilidade são descrições gráficas da variabilidade ou dispersão de dados. A confecção de um histograma deve-se em função da quantidade de dados analisados, no qual, diferentes abordagens podem ser adotadas para inferir na distribuição de probabilidade de cada parâmetro analisado. Se estas quantidades de dados forem relativamente altas, o ajuste de uma distribuição de probabilidades assumido pode ser mais representativo (BAECHER, 1987).

Na Geotecnia, isso não ocorre na realidade, devido ao elevado custo envolvido na obtenção de parâmetros pela repetição de ensaios de campo e de laboratório. Sendo assim, uma distribuição paramétrica apropriada pode ser ajustada aos dados obtidos. Essa abordagem, por vezes, se mostrou satisfatória, sendo as distribuições mais utilizadas na Geotecnia: distribuição normal e a log-normal (LUMB, 1966). Isto pela simplicidade e bom ajuste para a maior parte dos parâmetros geotécnicos (EL-RAMLY, 2001). É possível observar a distribuição normal e log-normal na Figura 2.5.

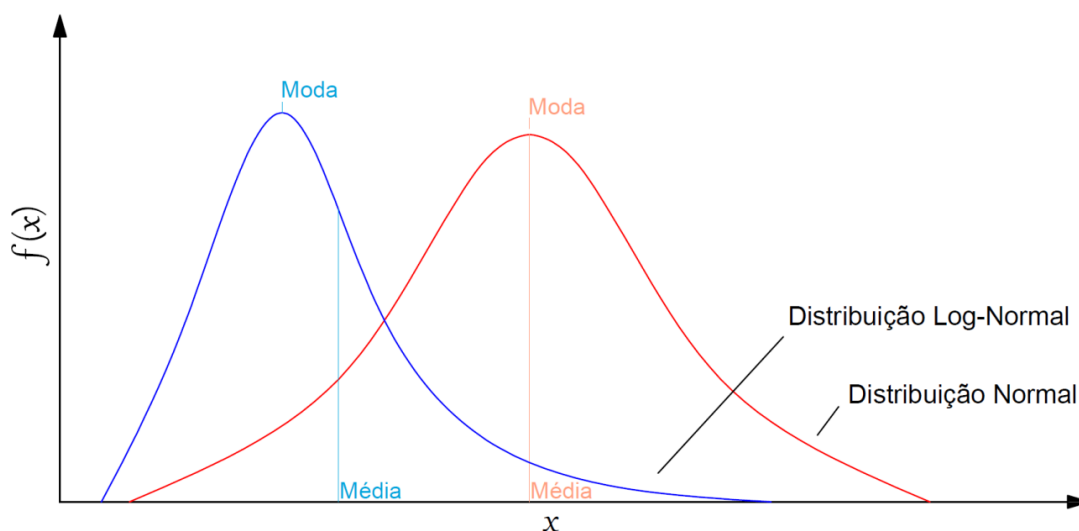


Figura 2.5 – Gráfico de uma distribuição de probabilidades normal e log-normal.

A distribuição normal ou *gaussiana* apresenta uma curva simétrica em forma de sino, dependendo, basicamente, da média e do desvio-padrão. A função de densidade de probabilidades pode ser fornecida pela Equação (2.2).

$$f_x(x) = \frac{1}{\xi \times \sqrt{2 \times \pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \times \left(\frac{x - \mu}{\xi} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

A função de distribuição cumulativa de probabilidades é fornecida pela Equação (2.3).

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\xi \times \sqrt{2 \times \pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \times \left(\frac{x - \mu}{\xi} \right)^2 \right] dz \quad (2.3)$$

Vale ressaltar que a Equação (2.3) não apresenta função analítica definida. Portanto, é necessário calcular probabilidades de ocorrência a partir de uma distribuição normal transformada, contendo média nula e desvio-padrão unitário.

A distribuição log-normal acontece quando o logaritmo de uma variável aleatória (X) corresponde a uma distribuição normal (ANG; TANG, 1975). A distribuição log-normal apresenta-se de forma assimétrica em relação à média, fornecendo valores sempre positivos. A distribuição log-normal é descrita em função dos parâmetros κ e δ , os quais são correlacionados com os momentos da distribuição normal, conforme Equações (2.4) e (2.5).

$$\kappa = \ln(\mu) - 0,5 \times \delta^2 \quad (2.4)$$

$$\delta = \sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 \right)} \quad (2.5)$$

- A função de densidade de probabilidades é fornecida conforme a Equação (2.6).

$$f_x(x) = \frac{1}{\delta \times x \times \sqrt{2 \times \pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \times \left(\frac{\ln(x) - \kappa}{\delta} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

Ao atribuir uma distribuição paramétrica, deve-se garantir que os valores mínimos e máximos da distribuição selecionada sejam consistentes com os limites físicos do parâmetro que está sendo modelado. Por exemplo, os parâmetros de resistência ao cisalhamento não podem ter valores negativos. Se a distribuição selecionada implica valores negativos, então, um limite mínimo prático é imposto na distribuição. Outra solução é a utilização de uma distribuição que não permita a adoção de valores negativos, por exemplo, a distribuição log-normal (EL-RAMLY, 2001).

2.2.4 Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Falha

Proposto por Hasofer e Lind (1974), o conceito de índice de confiabilidade permite calcular a probabilidade de falha do sistema para cada estado limite definido.

O conceito de estado limite diz respeito aos requisitos de serviço ou segurança que são desejáveis de um sistema. O não atendimento ao estado limite origina um modo de falha. Exemplos de modos de falhas na área geotécnica podem ser:

- Recalque na fundação (absoluto e diferencial);
- Formação de fissuras que afetem a estabilidade de uma barragem;
- Rompimento de um talude.

Na confiabilidade, os modos de falha são descritos com base nas variáveis do projeto. Sendo assim, para cada estado limite adotado, é preciso identificar as variáveis aleatórias que o afetam. Deste modo, considera-se a incerteza inerente aos parâmetros e aos fenômenos. A Equação (2.7) exemplifica a equação de estado limite descrita em função das variáveis aleatórias.

$$G(X) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (2.7)$$

De modo simplificado, o estado limite pode ser representado pela Equação (2.8).

$$G(R, S) = R - S = 0 \quad (2.8)$$

Onde: (R) é a resistência disponível e (S) é a ação solicitante.

Uma propriedade desta função é a determinação do ponto que determina o contorno que separa a região segura da região de falha. Isto ocorre quando o resultado do equacionamento for zero. Assim, é possível descrever a probabilidade de falha (P_f) de um sistema através da Equação (2.9).

$$\begin{aligned} P_f &= P[\{R \leq S\}] \\ &= P[\{R - S \leq 0\}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Observa-se a delimitação das regiões de segurança e de falha, definidas em função das variáveis aleatórias através da Figura 2.6. Sendo possível observar ainda, as curvas de nível da função distribuição conjunta de probabilidades e a equação do estado limite.

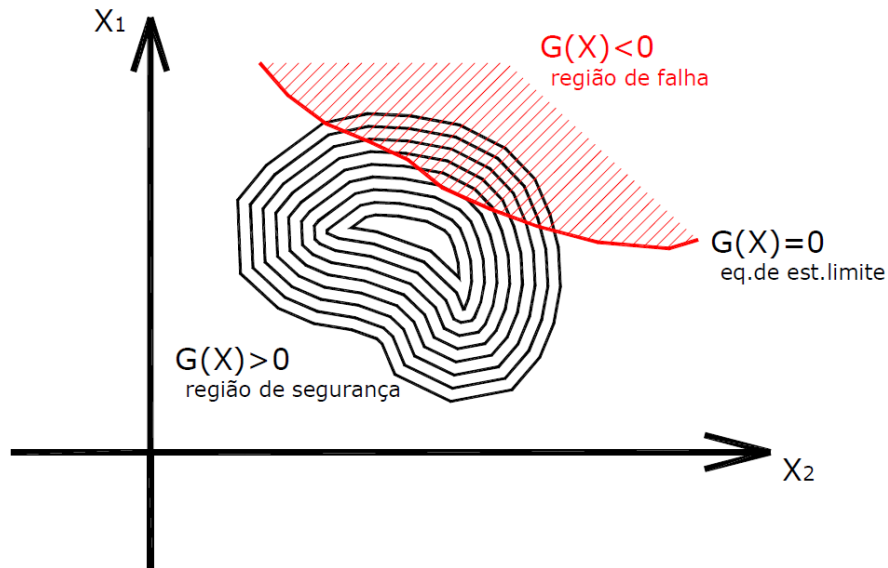


Figura 2.6 – Regiões segura e de falha no espaço físico das variáveis aleatórias.

Fonte: Nogueira (2010), pág. 173.

O conjunto geral das realizações da resistência disponível (R) e ação solicitante (S) resultam em condições que ultrapassam o estado limite, conforme visto na Equação (2.8). Denomina-se esta região como domínio de falha. Assim, a probabilidade de falha é a somatória de todas as realizações pertencentes ao domínio de falha, podendo ser definida pela Equação (2.10).

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^S f_{R,S}(r,s) dr ds \quad (2.10)$$

Onde: $f_{R,S}(r,s)$ é a função densidade conjunta de probabilidades da resistência disponível (R) e ação solicitante (S). E (r) e (s) são os valores assumidos pelas variáveis aleatórias de resistência disponível e ação solicitante.

Se as variáveis aleatórias forem estatisticamente independentes, a função de probabilidades pode ser substituída pelo produto direto das funções marginais de cada variável, obtendo o cálculo da probabilidade de falha conforme Equação (2.11).

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(s) \times F_R(s) dr ds \quad (2.11)$$

Com base em termos geométricos, o índice de confiabilidade é definido como a menor distância entre a equação de estado limite e a origem do espaço normal-padrão não-correlacionado das variáveis aleatórias.

Quando as variáveis aleatórias apresentam-se estatisticamente independentes, o índice de confiabilidade pode ser fornecido pela Equação (2.12).

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\xi_R^2 + \xi_S^2}} \quad (2.12)$$

Onde: (μ_R) e (μ_S) são, respectivamente, as médias de resistência e solicitação e, (ξ_R) e (ξ_S) são os respectivos desvios padrão.

No geral, as equações de estado limite são escritas em função de diversas variáveis aleatórias, contendo distribuições marginais de probabilidades que diferem da normal. Deste modo, o cálculo do índice de confiabilidade pode ser definido conforme Equação (2.13).

$$\beta = \min_u \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (2.13)$$

sujeito : $G(u_i) = 0$

Onde: (u_i) são as variáveis aleatórias no espaço normal-padrão não-correlacionado.

O índice de confiabilidade é definido no espaço adimensional das variáveis aleatórias, referenciado como espaço normal-padrão. Deste modo, necessita-se da transformação sobre as variáveis do espaço físico para o espaço normal-padrão não-correlacionado, a qual recebe o nome de transformação isoprobabilística. A transformação isoprobabilística é realizada quando as variáveis aleatórias são normais e independentes, de acordo com a Equação (2.14).

$$u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\xi_i} \quad (2.14)$$

Onde: (x_i) é o valor da variável no espaço físico.

A representação do índice de confiabilidade pode ser observada na Figura 2.7.

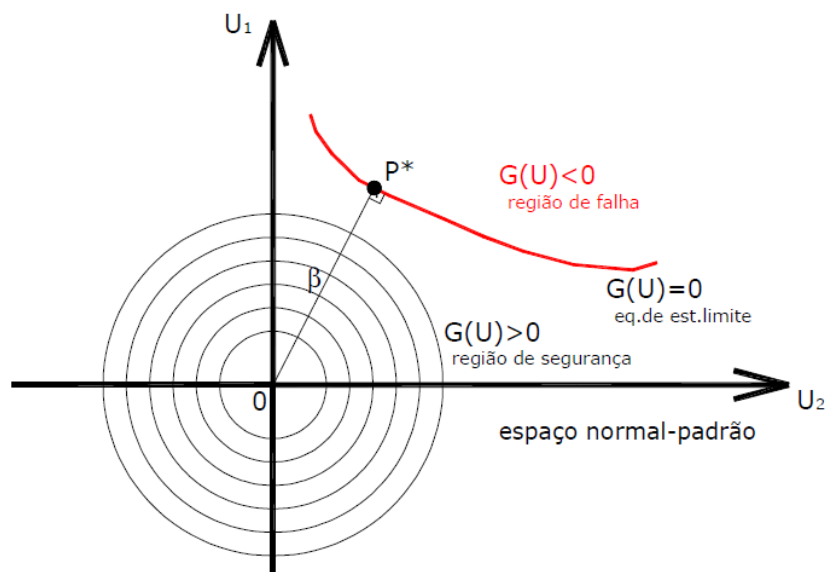


Figura 2.7 – Definição do índice de confiabilidade no espaço normal-padrão.

Fonte: Nogueira (2010), pág. 176.

Onde: (P^*) é definido como ponto de projeto localizado pela menor distância entre a origem do espaço normal-padrão das variáveis aleatórias e a equação de estado limite. O ponto de projeto encontra-se exatamente sobre a equação de estado limite e é caracterizado sendo o ponto com o maior conteúdo de probabilidades.

Com intuito de garantir os padrões aceitáveis de índice de confiabilidade e probabilidade de falha, o Corpo de Engenheiro do Exército Americano propôs valores alvos do índice de confiabilidade e sua respectiva probabilidade de falha de acordo com o nível de desempenho esperado do sistema. Estes valores podem ser observados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores de índice de confiabilidade e probabilidade de falha alvo de acordo com o nível de desempenho esperado.

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

Fonte: Adaptado de U.S. Army Corps Engineers (1995).

2.2.5 Métodos de Solução

As análises de confiabilidade aplicadas na área geotécnica visam a avaliação de probabilidades de falha, permitindo determinar o índice de confiabilidade através da função densidade conjunta das variáveis aleatórias levando em consideração o domínio de falha aguardado. Porém, na realidade, visto a dificuldade encontrada na determinação da função de densidade conjunta, diversos métodos foram criados para resolver o problema.

Dos métodos sugeridos para análises de confiabilidade destacam-se dois conjuntos: os dos métodos com base em transformações e os de métodos com base em simulações (ABRAMSON *et al.*, 2002).

Os métodos de confiabilidade com base em transformações têm como princípio assumir uma distribuição normal ou log-normal, para o fator de segurança. Seu desvio padrão é obtido a partir das médias e desvios padrão das variáveis aleatórias assumidas. Sendo assim, são considerados somente os dois primeiros momentos probabilísticos das funções de distribuição, a média e a variância. Segundo Abramson *et al.* (2002), os métodos de confiabilidade via transformação mais usuais na geotecnia são:

- Método de Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM)
- Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM);
- Método de Confiabilidade de Segunda Ordem (SORM);

O conjunto de métodos com base na simulação tem como característica representar o desempenho real do sistema, com base nos modelos matemáticos idealizados para representação do sistema. A simulação pode ser definida como a técnica de replicação de um modelo matemático que utiliza a variabilidade dos parâmetros inseridos neste (ANG; TANG, 1975), de modo, que as variáveis sejam conhecidas ou adotadas. Dentre essa família de métodos, destaca-se o método de simulação de Monte Carlo.

Neste trabalho, as análises probabilísticas foram realizadas por meio do *First Order Reliability Method* (FORM). O método de confiabilidade de primeira ordem permite considerar as funções densidades de probabilidades das variáveis aleatórias, bem como levar em conta as correlações entre pares de variáveis aleatórias.

A análise do índice de confiabilidade através do FORM consiste transformar as variáveis aleatórias do espaço físico correlacionado para o espaço normal-padrão não correlacionado. Esta transformação é realizada pelo modelo de Nataf, conforme observado na Figura 2.8.

A transformação do espaço físico correlacionado para o espaço padrão normal correlacionado baseia-se na transformação das funções densidade de probabilidade (FDP) não-normais em normais equivalentes. Essa transformação é baseada na proposta por Hasofer e Lind. No espaço normal-padrão determinam-se os valores dos coeficientes de correlação entre pares por uma matriz de correlação, a qual pode ser obtida através da matriz de correlação. E, por fim, aplica-se a decomposição ortogonal ou fatoração de Cholesky para eliminação da matriz de correlação. Esse processo consiste na transformação final do espaço normal-padrão correlacionado para o espaço normal-padrão sem correlação.

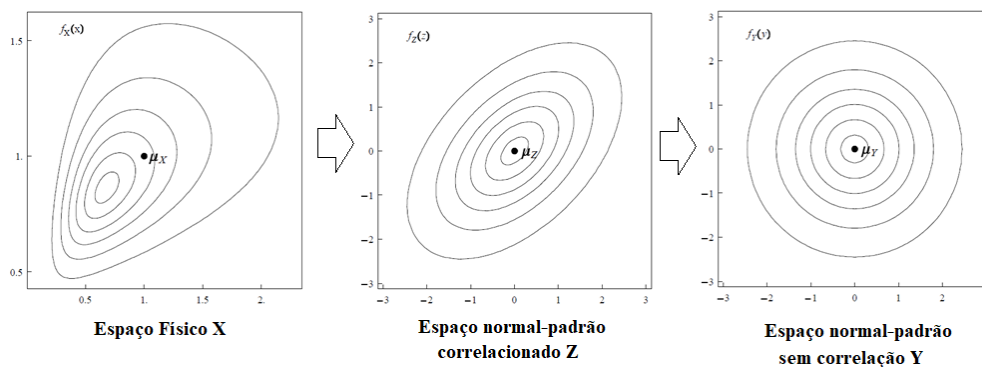


Figura 2.8 – Transformação do espaço físico correlacionado para o espaço normal-padrão sem correlação.

Fonte: Adaptado de Beck (2014).

O índice de confiabilidade é determinado conforme a referida Equação (2.13). A probabilidade de falha é relacionada com o índice de confiabilidade através da Equação (2.15).

$$p_{f_{FORM}} = 1 - \Phi(\beta) \quad (2.15)$$

Onde: $\Phi(\cdot)$ é a distribuição acumulada de probabilidades que ocorre no espaço normal-padrão.

2.3 Pesquisas Científicas Envolvendo Confiabilidade

Na análise de estabilidade de taludes, observado a elevada importância, devido ao risco associado à ruptura, existe a necessidade de uma quantificação aprofundada de probabilidade de ocorrência destes fenômenos. Embora diversos Métodos de Equilíbrio

Limite sejam utilizados na definição de um fator de segurança global, esses não consideram as incertezas e variabilidades que este sistema pode apresentar. Portanto, as análises determinísticas com base em Equilíbrio Limite por mais consagradas que sejam, podem apresentar resultados insatisfatórios.

Por oferecer uma avaliação da segurança global de taludes de forma consistente, considerando as incertezas dos parâmetros, o uso da Teoria da Confiabilidade vem se tornando crescente no meio geotécnico. Afirmando essa ideia, são demonstradas a seguir algumas pesquisas científicas no contexto internacional, envolvendo confiabilidade aplicada na análise de estabilidade de taludes.

Chowdhury e Xu (1994) realizam análises de estabilidade de talude através de métodos determinísticos e probabilísticos. Os métodos determinístico e probabilístico utilizados foram, respectivamente, o de Bishop Simplificado e a confiabilidade baseada nas definições de Hasofer – Lind. Como conclusão, os autores afirmam que a superfície crítica tende ser diferente entre as análises determinísticas e probabilísticas, sendo esta diferença relacionada ao alto valor do coeficiente de variação. Ou seja, quanto maiores os coeficientes de variação das variáveis aleatórias, maior a tendência das superfícies críticas não serem as mesmas.

Zhang *et al.* (2013) avaliaram a extensão do método de Hassan e Wolff (1999) acoplado a um método de superfície de resposta. A extensão foi aplicada na análise de confiabilidade de taludes considerando várias superfícies potenciais de deslizamento através da simulação direta de Monte Carlo. Esta extensão é capaz de representar o efeito de um grupo de superfícies críticas, correlacionando os fatores de segurança ao nível de sistema. Os autores afirmaram que a utilização do método de Hassan e Wolff, quando utilizado em taludes de geometrias relativamente simples, pode identificar com precisão a superfície de deslizamento mais crítica. E as superfícies de deslizamento detectadas por este método podem servir como superfícies de deslizamento representativas para avaliar a probabilidade de falha do sistema. Porém, quando utilizado em taludes com geometrias complexas, a resposta é menos precisa.

Cho (2013) analisou a confiabilidade de um talude considerando múltiplos modos de falha. A análise determinou os modos de falha significativos e suas respectivas probabilidades de falha. Para isso os autores aplicaram o método da barreira proposto por Der Kiureghian e Dakessian (1998), identificando os principais modos de falha. Após, aplicaram o método de multiponto de primeira ordem (FORM), encontrando a probabilidade de falha na união dos eventos aproximados. Através das análises em dois

taludes, o autor concluiu que o método sugerido permite estimar eficientemente a probabilidade de falha.

A investigação da influência da heterogeneidade na força de cisalhamento em solos não saturados foi realizado por Hicks *et al.* (2014). A modelagem 3D de um talude de solo argiloso foi baseada na teoria de Campo Aleatório, considerando a argila como um material linear elástico perfeitamente plástico. O cálculo de confiabilidade baseou-se na definição de deslocamento limite. Os autores afirmaram que análises realizadas apresentaram três categorias de modos de falhas. E, que de forma geral, a probabilidade de falha de cada modo é uma função da escala horizontal de variação da heterogeneidade do solo e da geometria do talude.

Li *et al.* (2015a) propuseram uma atualização eficiente da simulação de Monte Carlo, quando os níveis de probabilidades de falha forem relativamente baixos. A partir da determinação do tamanho da amostra, os autores analisaram a segurança do talude através da simulação de Monte Carlo com base no método de Bishop Simplificado. Utilizando-se da probabilidade de falha encontrada na primeira análise, propôs-se uma nova distribuição para estas amostras. E, por fim, calculou-se o índice de ponderação subjacente às amostras de falha com base nas distribuições conhecidas. O método proposto mostrou-se eficiente quando um grande número de amostras de falha é gerado. De modo que o domínio de falha seja povoado suficientemente. Porém, quando este cenário não for observado, os autores recomendam cautela no uso do método.

Li (2015b) empregou o método de superfície de resposta de modo a aperfeiçoar o método de simulação direta de Monte Carlo, quando os níveis de probabilidade de falha apresentam-se baixos. O método permitiu considerar a variabilidade espacial das propriedades do solo, analisando ainda a função de auto-correlação, para medir o grau de correlação espacial dos parâmetros do solo. O método de superfície de resposta foi modelado através da discretização de campos aleatórios não-Gaussianos correlacionados, utilizando-se da extensão da técnica de decomposição de Cholesky. Como conclusão, o autor afirmou que o método apresentou-se como uma ferramenta prática para resolver problemas de confiabilidade em taludes que demonstrem baixas probabilidades de falhas. Porém, por se utilizar decomposição de Cholesky, o método fica propenso a erros numéricos.

Li *et al.* (2015c) compararam análises de métodos de confiabilidade aplicadas em estabilidade de taludes idealizados em 3D. A análise comparativa se deu através de dois métodos: o simplificado de Vanmarcke e o dos elementos finitos aleatórios avançados.

Como conclusão, os autores descrevem que tanto a abordagem probabilística analítica de Vanmarcke quanto a abordagem dos métodos dos elementos finitos aleatórios fornecem resultados semelhantes quando se utilizam de escalas horizontais de flutuação grandes comparadas com o comprimento do talude. Porém, para valores de escalas horizontais inferiores ao comprimento do talude, as duas abordagens podem fornecer resultados significativamente diferentes.

Tang *et al.* (2015) consideraram a definição da distribuição de probabilidade dos parâmetros de resistência do solo para uma avaliação realista da confiabilidade. As análises foram realizadas baseadas em funções que acoplaram as distribuições de probabilidade multivariadas em suas distribuições marginais unidimensionais. Estas funções são denominadas cópulas. Os autores afirmaram que o índice de confiabilidade não pode ser determinado quando os dados de distribuição de probabilidade são incompletos. As probabilidades de falha do talude produzidas por diferentes cópulas podem modelar a estrutura de dependência entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Porém, o uso conjunto das abordagens baseadas nas cópulas propostas pode efetivamente reduzir a dispersão na probabilidade de falha resultando em uma estimativa mais razoável da confiabilidade.

A pesquisa de Jiang e Huang (2016) analisou quatro exemplos de taludes com altura superior a dez metros e/ou formado por variadas camadas de solo. As análises foram realizadas através de simulação direta de Monte Carlo, utilizando como base o método de Bishop simplificado. Com intuito de estabelecer a superfície de resposta entre o fator de segurança para cada potencial superfície de ruptura e de cada variável aleatória de entrada, foi utilizado um polinômio quadrático sem termos cruzados. Jiang e Huang (2016) demonstraram através das análises que o método proposto demonstrou-se eficiente para a estimativa de pequenas probabilidades de falhas.

Zeng *et al.* (2016) sugeriram um método que integra dois algoritmos de aproximação *quasi-Newton*. Para isso, os autores integraram o algoritmo Hasofer-Lind-Rackwitz-Fiessler e Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (HLRF-BFGS). Aproximando o algoritmo em uma matriz derivada de segunda ordem. O estado de limite de projeto foi calculado pelo método de primeira ordem (FORM). Posteriormente, a equação de estado limite de projeto e a matriz derivada de segunda ordem foram utilizadas na estimativa da probabilidade de falha. O índice de confiabilidade foi calculado através do método de segunda ordem (SORM) modificado. As estimativas de probabilidade de falha obtidas

foram tão eficazes quanto os obtidos pelo método de segunda ordem convencional, porém, com um esforço computacional reduzido.

Li *et al.* (2016a) propuseram um método de simulação probabilística da estabilidade em taludes convergindo os métodos de Equilíbrio Limite com o Método de Elementos Finitos (MEF). Esta abordagem conjunta foi calculada através da simulação direta de Monte Carlo Avançada com base em métodos de Equilíbrio Limite. Na sequência, foi realizada a análise de confiabilidade fundamentada no Método de Elementos Finitos, obtendo-se a estimativa alvo. Na sequência, as informações geradas da primeira análise foram incorporadas na segunda, o resultado final é alcançado por meio do condicionamento da resposta. Os resultados apresentaram índices de confiabilidade consistentes da estabilidade de taludes. O método também minimizou a exigência computacional quando os níveis de probabilidade de falha apresentaram-se relativamente pequenos.

O artigo de Li *et al.* (2016b), aplicou diferentes métodos de superfícies de resposta para determinação de probabilidade de falha em taludes. Os autores concluíram que o método de superfície de resposta MSRSM (*Multiple Stochastic Response Surface Method*) é o mais indicado para resolver problemas de confiabilidade de taludes de solos com alta variabilidade espacial com uma única ou com múltiplas camadas de solos.

No cenário nacional, se destacam importantes estudos de diversificadas áreas envolvendo Teoria da Confiabilidade. Na Engenharia Civil a Teoria da Confiabilidade aplicada em análises em componentes estruturais exerce releva importância no meio científico brasileiro.

Sagrilo e Lima (1997) propuseram um procedimento simplificado para a análise da probabilidade de colapso estrutural global de plataformas marítimas fixas. Utilizou-se o método de primeira ordem (FORM) na avaliação da probabilidade de falha, o equacionamento do estado limite baseou-se na capacidade limite última da estrutura relacionada ao momento último de tombamento e ou a força cisalhante última atuando na base. Através do exemplo proposto, os autores identificaram que o procedimento simplificado demonstrou-se aceitável, verificando ainda que a incerteza que apresenta a maior sensibilidade é a relacionada ao carregamento ambiental.

Freitas *et al.* (2007) analisaram a confiabilidade de vigas de perfis I laminados para o estado limite de flexão por meio do método de primeira ordem (FORM). As análises, inclusive tiveram como base a norma brasileira NBR8800 do ano de 1986 e de acordo com a revisão realizada no ano de 2003. Os resultados demonstraram divergências entre as

normas assumidas, apontando um menor valor de índice de confiabilidade para a NBR8800:2003.

Na pesquisa de Beck e Doria (2008) por intermédio da análise de confiabilidade estrutural avançada (*FE-based*), avaliou-se a segurança de colunas de aço de seção I de acordo com a revisão da norma brasileira de projetos de edifícios de aço e de ações e segurança nas estruturas (NBR8800 e NBR8681). Por meio de comparação do resultado obtido com os índices de confiabilidade alvo propostos pelas normas da EUROCODE e ANSI, os autores concluíram que para os exemplos analisados a norma brasileira NBR8800 fornece níveis aceitáveis de segurança quando a relação de ações permanentes e variáveis apresentam os mesmos valores nominais, porém, quando esses valores diferem, tendo o valor de ações variáveis apresentando maior proporção, a confiabilidade apresenta-se inaceitável. Sendo assim, a norma brasileira fornece coeficientes de segurança que não garantem as incertezas presentes nessas ações.

Silva *et al.* (2008) analisaram a probabilidade de falha quanto ao estado limite de serviço de fissurações em tubos de concreto armado. Os métodos de confiabilidade aplicados foram o método de primeira ordem e segundo momento (FOSM) e de simulação de Monte Carlo. Através dos exemplos analisados, os autores concluíram que para um mesmo valor de fator de segurança, as formulações preconizadas na norma levaram a valores distintos de índice de confiabilidade. O estudo ainda demonstrou que as variáveis de maior importância são a altura útil da armadura, resistência do concreto e espessura da parede do tubo.

Nogueira *et al.* (2012) propuseram uma análise probabilística para verificação da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado através da simulação de Monte Carlo e do método de primeira ordem (FORM) com uma abordagem via acoplamento direto. As análises tiveram como base a segunda lei de Fick da difusão. As análises foram aplicadas em exemplos considerando duas categorias diferentes de agressividade do ambiente e várias combinações de cobrimento de armadura e propriedades de concreto. Assim, os autores concluíram que a espessura do cobrimento tem alta influência na penetração de íons de cloreto, deste modo, a análise proposta mostrou-se uma ferramenta eficaz de determinação dos valores ótimos para o cobrimento de concreto.

No conceito geral da Engenharia Geotécnica nacional também é possível observar a aplicação da Teoria da Confiabilidade.

O estudo de Espósito *et al.* (2002) aplicou confiabilidade na análise de verificação de liquefação de barragens de rejeitos. Com isso, verificou-se a influência da variabilidade da porosidade do solo. O método aplicado em dois exemplos de talude constatou que a análise de liquefação realizada de maneira probabilística pode fornecer subsídios importantes para aperfeiçoamento de projetos de barragens de rejeitos granulares.

Aoki (2002) realizou análise probabilística quanto à carga admissível em estacas. Adotando os esforços solicitantes e resistentes atuando na estaca como variáveis aleatórias, o autor aplicou a transformação isoprobabilística encontrando a probabilidade de falha da estaca. Como conclusão, Aoki defende que a carga admissível seja dimensionada em função do valor encontrado pelo método determinístico associado a uma probabilidade de falha.

O estudo realizado por Aoki (2008) demonstra a importância da realização da análise probabilística. A ideia é enfatizada vista as incertezas inerentes ao sistema, principalmente, as intrínsecas ao solo e as associadas às cargas quando a análise de segurança diz respeito a estruturas de fundações. O estudo realizou a verificação da relação entre a abordagem determinística e probabilística, averiguando ainda o risco associado em função do número de estacas e da carga solicitante. Com isso, o autor conclui que projetos geotécnicos devem considerar a abordagem determinística pertinente à probabilidade de falha e ao risco associado, enfatizando inclusive que o público geral, o investidor e o projetista devem sempre conhecer e concordar que existe uma probabilidade de falha e, conseqüentemente, um risco envolvido, sendo todos relacionados ao projeto geotécnico.

Azevedo *et al.* (2016) levantaram áreas mais propensas a deslizamento através de sistemas de informação geográficas (SIG), na sequência, analisaram a probabilidade de falha quanto ao deslizamento por meio do método de estimativas pontuais, aplicando expansão e série de Taylor. Concluíram que esta abordagem permitiu uma avaliação consistente da probabilidade de falha.

Silva *et al.* (2017) propõem uma análise de probabilidade de falha de fundações em estacas hélices contínuas através de um ajuste estatístico da amostra. A parcela de resistência da equação de estado limite foi obtida através de resultados de provas de carga publicados na literatura, quanto à parcela resistente, referente às quantidades restritas de ensaios in situ, aplicou-se o conceito do *order statistic*. Assim, os autores concluíram que o conceito do *order statistic* aplicado em função do tamanho da população apresenta-se como uma ferramenta promissora na avaliação da probabilidade de falha de elementos de fundações.

2.3.1 Considerações a Respeito da Revisão Bibliográfica

A aplicação da Teoria da Confiabilidade no meio científico internacional sofreu gradativo aumento nas últimas décadas. Na Geotecnia, especificamente aplicada na análise de estabilidade de taludes, a Teoria da Confiabilidade vem ganhando destaque nos últimos trinta anos.

As pesquisas de segurança de taludes nos dias atuais, envolvendo análises probabilísticas no cenário mundial apresentam-se consolidada no meio científico, isso devido à aceitabilidade de uma probabilidade de falha associado a um determinado Fator de Segurança.

No cenário nacional a Teoria da Confiabilidade é aplicada de modo mais abrangente na área estrutural. Na Engenharia Geotécnica ocorreu um avanço da aplicação da Teoria da Confiabilidade, tendo como um dos grandes percursores desse assunto o Professor Nelson Aoki. Em suas pesquisas, de modo geral, as análises probabilísticas são aplicadas em fundações em estaca.

Com relação aos métodos que servem como base nas análises probabilísticas de estabilidade de taludes abordadas na revisão bibliográfica, verificou-se o emprego de forma mais abrangente dos métodos de Equilíbrio Limite. Ainda nos últimos anos percebe-se um aumento gradativo de estudos que se embasam no método de Elementos Finitos. Quanto os métodos de confiabilidade empregados nessas análises, verificou-se o maior uso dos métodos de confiabilidade de primeira ordem (FORM) e a simulação de Monte Carlo. As pesquisas da revisão bibliográfica que aplicaram o FORM destacam a possibilidade de verificação da sensibilidade das variáveis aleatórias. Já nos estudos onde taludes analisados apresentaram baixas probabilidades de falha ou modelos mecânicos complexos observou-se de forma mais abrangente o emprego da simulação de Monte Carlo com técnicas especiais de amostragem por importância e redução de variância.

Verificou-se ainda que a evolução dos estudos de aplicação da confiabilidade na análise da estabilidade de taludes demonstra uma tendência de proposições de modelagens e aprimoramento dos métodos em função do custo computacional exigido. Isto se justifica visto que os taludes estudados, por vezes, podem mostrar-se com variados estratos, percolação de água em meio poroso e modelos mecânicos complexos, de modo que o equacionamento do estado limite pode apresentar-se de modo não linear.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As análises de estabilidade de taludes inicialmente foram realizadas por meio das implementações dos métodos de Equilíbrio Limite em uma planilha eletrônica Microsoft EXCEL®. O intuito dessa implementação preliminar no formato de planilha foi obter familiaridade com os métodos adotados, para que em seguida, fossem incorporados em uma linguagem de programação de interesse. Os métodos de Equilíbrio Limite escolhidos para realização das análises de confiabilidade foram:

- Fellenius;
- Bishop Simplificado;
- Janbu Simplificado: a forma simplificada não considera as forças de interação entre as lamelas;
- Janbu Generalizado: a forma generalizada considera as forças de interação entre as lamelas através do fator de correção proposto por Gerscovich (2012).

Os métodos fundamentados no Equilíbrio Limite implementados em planilha eletrônica justificaram-se devido às elevadas referências presentes na literatura (NIEBLE; GUIDICINI, 1984; MASSAD, 2010; DAS, 2011; GERSCOVICH, 2012).

Na sequência, programou-se o *Risk Analysis applied to Slope Stability* (RASS), que é um programa computacional que contém os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) referenciados acima. O objetivo de sua criação foi seu acoplamento ao programa computacional de confiabilidade RELgen. Esse, por sua vez, é um programa computacional que considera diferentes tipos de métodos de confiabilidade, sendo tanto os com base na transformação quanto simulação.

Paralelamente, ocorreu uma revisão bibliográfica com finalidade de levantar tipos de solos possíveis de aplicabilidade em taludes, juntamente com suas características estatísticas. Após estes processos, foram realizadas análises de confiabilidade e de fator de segurança (métodos determinísticos) em taludes idealizados, conforme o roteiro observado na Figura 3.1.

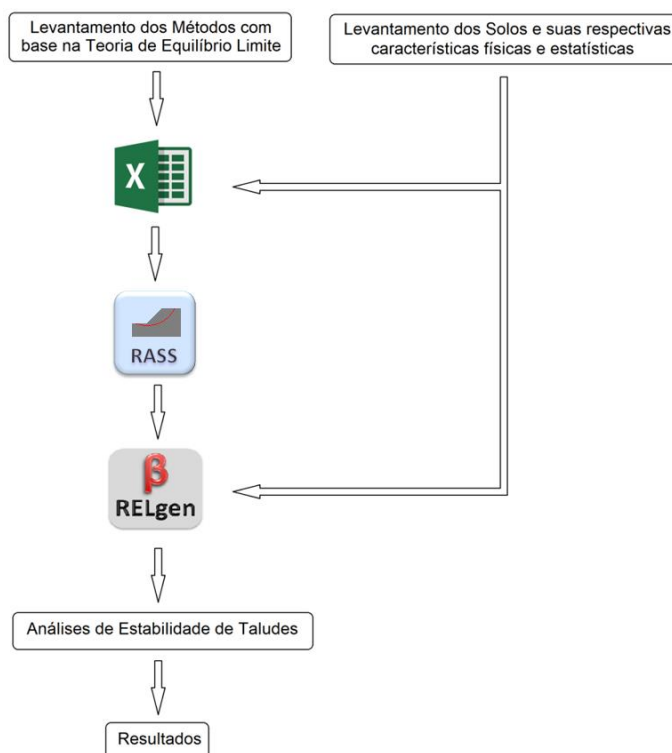


Figura 3.1– Fluxograma da metodologia.

A descrição detalhada dos métodos é apresentada nos subitens deste capítulo.

3.1 Adoção do Método para Análise de Confiabilidade

O método adotado para as análises probabilísticas de estabilidades de taludes que compõe o trabalho foi o *First Order Reliability Method* – FORM. Os critérios utilizados para a escolha deste método foram devido à eficiência computacional. Considerando que quando comparado com métodos como a simulação de Monte Carlo, o FORM apresenta um menor gasto computacional e a possibilidade de análise simultânea da influência das variáveis aleatórias adotadas na análise probabilística sobre a probabilidade de falha (BECK, 2006).

Em confiabilidade aplicada em casos de engenharia, o termo falha é usado para se referir a qualquer ocorrência de um evento adverso ao esperado. Desde o colapso geral em um sistema quanto a itens que gerem necessidade de manutenção (U.S. ARMY CORPS ENGINEERS, 1995). Neste estudo, a falha é caracterizada pela ruptura do talude e o estado limite é definido conforme Equação (3.16).

$$g(X) = FS(X) - 1 \quad (3.16)$$

O FORM leva em conta a correlação e a possibilidade do uso de variáveis aleatórias não normais. Esse tipo de extensão garante maior abrangência nas análises de confiabilidade. Visto que diversos parâmetros de projeto possuem, na prática, distribuições de probabilidade diferentes da distribuição normal.

3.2 Programa Computacional Acoplado

O programa computacional utilizado nas análises de confiabilidade foi o Análise de Confiabilidade Geral (RELgen). Desenvolvido por Nogueira (2010), o RELgen foi utilizado nesse trabalho para realização de análise de confiabilidade aplicada a estruturas de concreto armado (viga).

O programa realiza análises de confiabilidade através dos métodos de simulação de Monte Carlo puro e do FORM com a possibilidade de acoplamento direto com superfícies de respostas. O RELgen permite que o usuário defina os critérios de convergência, como o número máximo de iterações e tolerância de erro de parada de verificação.

Os métodos de Equilíbrio Limite referenciados foram inseridos ao RELgen através do *Risk Analysis applied to Slope Stability* (RASS). O RASS é um programa com linguagem computacional FORTRAN em que os métodos com base na Teoria de Equilíbrio Limite foram implementados. Esta etapa foi desenvolvida pelo grupo de estudos de estabilidade de taludes da UNESP Bauru. A criação do RASS surgiu da necessidade de uma ferramenta com baixo custo computacional e que fornecesse os modelos mecânicos de forma compatível com o programa computacional de análise de confiabilidade RELgen. Deste modo, o RASS foi incorporado ao RELgen fornecendo os métodos de Equilíbrio Limite, conseqüentemente, o equacionamento do estado limite.

Detalhes da programação dos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado em planilha eletrônica podem ser verificados em Assis *et al.*, (2017). A programação dos métodos de Bishop Simplificado e Fellenius no RASS, juntamente com o seu acoplamento no RELgen, são descritas por (ASSIS, 2017).

Os dados de entrada a serem inseridos neste tipo de análise são referente às propriedades físicas e quantidade de solos que compõem o talude: altura e/ou presença de nível d'água (N.A.), parâmetros geométricos do talude e da superfície crítica analisada, juntamente com o número de lamelas com que a superfície crítica analisada é dividida. Os dados de entrada e os resultados gerados pelo RASS acoplado no RELgen podem ser observados conforme Figura 3.2 e Figura 3.3.

```

----- ARQUIVO PRINCIPAL DE ENTRADA DE DADOS DO PRPGRAMA PARA ANALISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES -----
----- ESCOLHA DO METODO DE ANALISE DO TALUDE -----
1
----- GEOMETRIA DO TALUDE -----
ALTURA DO DESNIVEL (em metros)
10
COMPRIMENTO DA PROJECAO HORIZONTAL (em metros)
10
NUMERO DE LAMELAS (valor inteiro positivo adimensional)
300
----- GEOMETRIA DA SUPERFICIE DE RUPTURA DO TALUDE -----
NUMERO DE POSICOES DO CENTRO E RAI0
6
POSICAO      X_centro (m)   Y_centro (m)   Raio (m)
1             1.0           11.0           13
2             1.5           11.0           12
3             2.0           11.0           12
4             1.0           11.0           13
5             1.5           11.0           13
6             2.0           11.0           13
----- POSICAO DO NIVEL D'AGUA -----
COTA DA LINHA DE AGUA (em metros)
5.00
----- PARAMETROS DO SOLO -----
NUMERO DE SOLOS QUE COMPOEM O TALUDE
2
SOLO   COESAO (kPa)   ANG.ATRITO (graus)   GAMA (kNm-3)   COTAI (metros)   COTAF (metros)
1      24.2          34.00                16.92          10.0             5.00
2      5.3           32.40                19.92          5.0              -100.00
-----
* DESCRICAO DO CODIGO DE CADA METODO DE EQUILIBRIO LIMITE *
FELLENIUS              = 1
BISHOP SIMPLIFICADO    = 2
DANBU SIMPLIFICADO     = 3
DANBU GENERALIZADO     = 4
MORGENSTERN - PRICE    = 5
    
```

Figura 3.2 – Interface de entrada de dados do programa RASS.
 Fonte: Programa computacional RASS.

As inserções de dados de entrada e obtenção de resultados obtidos ocorrem através de arquivos de formato “.txt” (bloco de notas).

```

-- MODO FALHA --  --- FS ---  --- BETA ---  --- PF ---  --- ALFA1 ---  --- ALFA2 ---  --- ALFA3 ---  --- ALFA4 ---
1.00            1.2682      2.9391      0.164609E-02  0.194889E+00  0.240192E-01  0.686953E-01  0.712396E+00
2.00            1.2851      3.2351      0.608065E-03  0.268533E+00  0.482469E-01  0.625770E-01  0.620644E+00
3.00            1.3084      3.4374      0.293720E-03  0.243832E+00  0.439416E-01  0.569901E-01  0.655236E+00
4.00            1.2682      2.9391      0.164609E-02  0.194889E+00  0.240192E-01  0.686953E-01  0.712396E+00
5.00            1.2857      3.0796      0.103635E-02  0.178747E+00  0.220442E-01  0.630318E-01  0.736177E+00
6.00            1.3089      3.2747      0.528852E-03  0.165062E+00  0.204665E-01  0.584169E-01  0.756055E+00
    
```

Figura 3.3 – Interface de saída de dados do programa RASS.
 Fonte: Programa computacional RASS.

A interface de entrada e a saída de dados do RELgen podem ser observadas na Figura 3.4 e Figura 3.5.

```

----- ARQUIVO PRINCIPAL DE ENTRADA DE DADOS DO RELgen -----
----- TIPOS DE ANÁLISE -----
1
----- NÚMERO DE MODOS DE FALHA -----
6
----- NÚMERO DE VARIÁVEIS ALEATÓRIAS -----
4
----- ESTATÍSTICAS DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS -----
V. A.      MÉDIA    DESV. PADR.   DISTR. PROB.
1          24.2    3.63         2
2          34.0    3.40         2
3          5.30   0.795        2
4          32.4    3.24         2
----- SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS -----
GR. POL.  PE. EXP.  TER. CRUZ.   TER. CRUZ. ORDEM 3  SUPERFÍCIES DE RESPOSTAS
2          1          1             2                    1
----- SEMENTE PARA SIMULAÇÃO -----
11111111
----- TOLERÂNCIA PARA CONVERGÊNCIA -----
0.001
----- NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES/SIMULAÇÕES -----
100000

Tipos de Análise Disponíveis:
1 - Acoplamento Direto via FORM
2 - MONTE CARLO puro
3 - Domínios Compostos via FORM/RSM/MC sem ou com Termos Cruzados de ordem 2 ou 3
4 - ...

Códigos para Distribuições de Probabilidades (DISTR.PROB.) Disponíveis:
0 - Distribuição UNIFORME
1 - Distribuição NORMAL
2 - Distribuição LOGNORMAL
3 - Distribuição GUMBELL (Extremo Tipo I - máximos)
4 - Distribuição GAMMA

Códigos para Grau do Polinômio das Superfícies de Resposta (GR.POL.) Disponíveis:
1 - Polinômio de Primeiro Grau
2 - Polinômio de Segundo Grau

Códigos para Planos de Experiência das Superfícies de Resposta (PE.EXP.) Disponíveis:
1 - Plano ESTRELA

Códigos para consideração ou não de Termos Cruzados no polinômio (TER.CRUZ.) Disponíveis:
1 - Não considera termos cruzados
2 - Sim considera termos cruzados

Códigos que definem a ordem da aproximação polinomial (Ter.Cruz.Ordem 3) Disponíveis:
1 - Não considera os termos cruzados de ordem 3 (ex.: a*xi*xj*xk, pois de ordem 2 são automáticos)
2 - Sim considera os termos cruzados de ordem 3 (ex.: a*xi*xj*xk, pois de ordem 2 são automáticos)

```

Figura 3.4 – Interface de entrada de dados do programa RELgen.

Fonte: Programa computacional RELgen.

No caso de análise de estabilidade de taludes, o RELgen em conjunto com o RASS fornecem arquivo de saída contendo os seguintes dados:

- Fator de Segurança (FS);
- Índice de Confiabilidade (β);
- Probabilidade de Falha (P_f);
- Influências das Variáveis Aleatórias;
- Coordenadas do Ponto de Projeto no Espaço Físico;
- Coordenadas do Ponto de Projeto no Espaço Normal-Padrão;
- Erro em Termos do Índice de Confiabilidade;
- Erro em Termos das Coordenadas do Ponto de Projeto;
- Número de Iterações.

Os arquivos de saída são observados na Figura 3.3 e Figura 3.5.

```

----- ARQUIVO PRINCIPAL DE SAIDA DE DADOS DA ANALISE DE CONFIABILIDADE -----
----- Iteracao:      1 -----
----- COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO NO ESPACO FISICO -----
      X1      X2      X3      X4
0.203687E+02 0.327845E+02 0.481283E+01 0.248869E+02
----- COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO NO ESPACO NORMAL-PADRAO -----
      Y1      Y2      Y3      Y4
-0.986759E+00 -0.308509E+00 -0.541636E+00 -0.227477E+01
----- EQUACAO DE ESTADO LIMITE NO ESPACO FISICO -----
      GX
0.000000E+00
----- FATORES DE SENSIBILIDADE -----
      A1      A2      A3      A4
0.148955E+00 0.145602E-01 0.448796E-01 0.791605E+00
0.385947E+00 0.120666E+00 0.211848E+00 0.889722E+00
----- INDICE DE CONFIABILIDADE -----
      Beta
2.5567
----- PROBABILIDADE DE FALHA -----
      PFa11
0.528323E-02
----- ERRO EM TERMOS DO INDICE DE CONFIABILIDADE -----
      Erro
0.100000E+01
----- ERRO EM TERMOS DAS COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO -----
      Erro
0.100000E+01

----- Iteracao:      2 -----
----- COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO NO ESPACO FISICO -----
      X1      X2      X3      X4
0.199985E+02 0.324450E+02 0.471201E+01 0.258871E+02
----- COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO NO ESPACO NORMAL-PADRAO -----
      Y1      Y2      Y3      Y4
-0.120271E+01 -0.418899E+00 -0.712249E+00 -0.219195E+01
----- EQUACAO DE ESTADO LIMITE NO ESPACO FISICO -----
      GX
0.000000E+00
----- FATORES DE SENSIBILIDADE -----
      A1      A2      A3      A4
0.208612E+00 0.253068E-01 0.731617E-01 0.692920E+00
0.456740E+00 0.159081E+00 0.270484E+00 0.832418E+00
----- INDICE DE CONFIABILIDADE -----
      Beta
2.6332
----- PROBABILIDADE DE FALHA -----
      PFa11
0.422881E-02
----- ERRO EM TERMOS DO INDICE DE CONFIABILIDADE -----
      Erro
0.290579E-01
----- ERRO EM TERMOS DAS COORDENADAS DO PONTO DE PROJETO -----
      Erro
0.116918E+00

```

Figura 3.5 – Interface de saída de dados do programa RELgen.

Fonte: Programa computacional RELgen.

3.3 Caracterização do Solo

A caracterização estatística das propriedades físicas do solo é obtida através de realização de ensaios *in situ* ou em laboratórios. Um número de experimentos mínimos, considerado aceitável é de no mínimo 20 (ANG; TANG, 1975). Na geotecnia recomenda-se que a quantidade mínima de ensaios para definição estatística dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo seja de quatro ensaios, e mínimo de três ensaios para peso específico do solo (MIRANDA, 2005). É verificado ainda que quanto maior o número de ensaios realizados, a determinação estatística do solo tende a ser mais representativa de acordo com a realidade. É importante ressaltar que neste trabalho não houve realização de ensaios de laboratório para obtenção dos parâmetros de resistência ao

cisalhamento do solo, bem como também não houve qualquer obtenção de propriedades do solo em laboratório.

Com relação às propriedades dos solos, os parâmetros físicos, variáveis aleatórias e função densidade de probabilidade foram adotadas com referências na literatura.

As variáveis aleatórias adotadas para análise de confiabilidade realizadas nesta dissertação foram o ângulo de atrito interno e a coesão (valores efetivos). Ambas as variáveis aleatórias foram consideradas como não correlacionadas.

A função densidade de probabilidades assumida para ambas as variáveis aleatórias foi a de Log-Normal. De acordo com o que El-Remly (2001), mesmo que a função densidade de probabilidade normal se adeque às variáveis aleatórias de ângulo de atrito e coesão, a adoção da função densidade de probabilidade de Log-Normal é mais apropriada, visto suas características de fornecer somente valores positivos.

Nas análises realizadas para avaliação da superfície crítica, influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias e inclinação da superfície do talude foram selecionados solos com maior valor de ângulo de atrito, maior valor de coesão e um solo com parâmetros de resistências intermediários. Deste modo, o solo com predominância de ângulo de atrito foi referenciado neste trabalho como solo arenoso, o com maior valor de coesão foi denominado de solo argiloso e o com parâmetros de resistências intermediárias chamado de solo misto.

Os solos adotados nas análises do primeiro grupo são descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação estatísticas do solo assumidos para análises de determinação da superfície crítica, influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias e inclinação da superfície do talude.

	ARENOSO			ARGILOSO			MISTO		
	Li <i>et al.</i> (2015b)			Chowdhury e Xu (1994)			Li <i>et al.</i> (2015b) Li <i>et al.</i> (2016b)		
	Média	C.V. [%]	FDP	Média	C.V. [%]	FDP	Média	C.V. [%]	FDP
Coesão (c') [kPa]	5	15	Log-Normal	56	24	Log-Normal	10	30	Log-Normal
Ângulo de Atrito (ϕ') [graus]	46	10	Log-Normal	8	21	Log-Normal	30	20	Log-Normal
Peso Específico (γ) [kN/m ³]	20	-	-	20	-	-	20	-	-

Vale ressaltar quanto ao solo arenoso, o alto valor de ângulo de atrito não representa de forma geral o solo arenoso, porém, é assumido neste trabalho para análises de fins acadêmicos. No artigo de Li *et al.* (2015b), o solo arenoso foi aplicado em um aterro (compactado), sendo assim, justifica o alto valor de ângulo de atrito

A análise realizada do comportamento do talude quanto ao fator de segurança e índice de confiabilidade, conforme posição do nível d'água, adotou o solo do campo experimental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" do campus de Bauru - SP. O critério de adoção deste solo se deu pela necessidade de estabelecer parâmetros físicos para um mesmo solo natural e saturado. Quanto à escolha das variáveis aleatórias e funções densidade de probabilidade foram mantidas as mesmas assumidas para o solo arenoso, conforme descrito na Tabela 3.1.

O presente trabalho adotou o solo saturado sendo este referenciado por Fernandes (2016a), em que a amostra ensaiada foi retirada da profundidade de 5,0 m com valor de sucção de ensaio é de 0 kPa. O solo natural (seco) assumido foi da amostra ensaiada colhida igualmente na profundidade de 5,0 m, porém, contendo a sucção de 200 kPa. Os parâmetros estatísticos adotados para este solo são descritos conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação estatísticas do solo adotado para análise de determinação da influência da elevação do nível d'água.

	SOLO NATURAL (BAURU-SP)			SOLO SATURADO (BAURU-SP)		
	Fernandes (2016a)			Fernandes (2016a)		
	Média	C.V. [%]	FDP	Média	C.V. [%]	FDP
Coesão (c') [kPa]	24,2	15	Log-Normal	5,3	15	Log-Normal
Ângulo de Atrito (ϕ') [graus]	34	10	Log-Normal	32,4	10	Log-Normal
Peso Específico (γ) [kN/m³]	16,92	-	-	19,92	-	-

3.4 Análises Realizadas

Foram realizadas análises determinísticas e probabilísticas dos taludes, com os seguintes objetivos:

- Determinação da superfície crítica tanto para os métodos determinísticos (obtenção do fator de segurança) quanto para o método probabilístico (obtenção do índice de confiabilidade);
- Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias em relação ao índice de confiabilidade;
- Influência da inclinação da superfície do talude em relação ao fator de segurança e ao índice de confiabilidade;
- Influência da elevação da posição do nível d'água no talude quanto ao fator de segurança e índice de confiabilidade.

De modo geral, as análises tiveram finalidade de estabelecer comportamentos de estabilidade de taludes com diferentes solos, sofrendo ainda a influência da variação da posição do nível d'água, isto é, não foi considerado qualquer tipo de fluxo no maciço de solo.

3.4.1 Análise de Superfície Crítica do Talude

Esta análise teve como objetivo a comparação das superfícies críticas do talude em relação aos métodos determinísticos de equilíbrio limite e o método probabilístico. A análise foi realizada de forma individual para os três tipos de solos considerados. A geometria do talude foi mantida fixa, sendo a altura considerada foi de 10 metros e inclinação da superfície do talude de 45° . As superfícies críticas foram discretizadas em 300 lamelas. O talude idealizado pode ser observado na Figura 3.6.

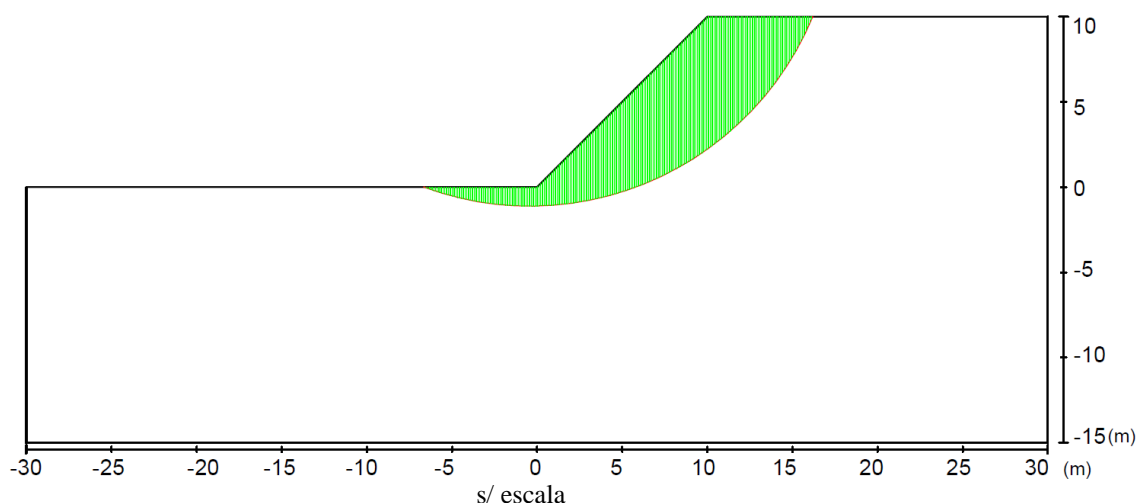


Figura 3.6 – Talude adotado para as análises de superfície crítica.

As superfícies foram investigadas a partir da criação de uma malha contendo os pontos possíveis de centro do círculo e raios, variando-se o seu comprimento. O critério de adoção da malha e raio se deu através da busca da região onde concentrasse os fatores de segurança mais críticos (método determinístico). Em função disto, foram adotados raios e malhas diferentes para cada análise, referentes aos tipos de solo. Os valores são observados nas Tabela 3.3, Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.3 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo arenoso.

SOLO ARENOSO							
Range [m]		Escalonamento [m]		Raio [m]		Escalonamento [m]	
X _{C0}	-7,3	X _{Cn}	2,7	0,5	R ₀	17,2	1
Y _{C0}	10,5	Y _{Cn}	19,5	0,5	R _n	21,2	

O termo escalonamento é utilizado para referenciar a distância em que os eixos da malha e o comprimento do raio foram divididos. Sendo assim, para o solo predominantemente arenoso, esta malha juntamente com o número de raios geraram o total de 1.800 superfícies de análises. A malha e os raios adotados na análise do solo argiloso são definidos pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo argiloso.

SOLO ARGILOSO							
Range [m]		Escalonamento [m]		Raio [m]		Escalonamento [m]	
X _{C0}	-4,5	X _{Cn}	6,0	0,5	R ₀	15,29	1
Y _{C0}	10,1	Y _{Cn}	18,1	0,5	R _n	19,29	

A malha e o raio assumidos para o solo predominantemente argiloso gerou 1.680 superfícies de análises. Quanto ao solo misto, a malha e os raios adotados podem ser observados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dados da malha adotada para análise da superfície crítica do solo misto.

SOLO MISTO							
Range [m]		Escalonamento [m]		Raio [m]		Escalonamento [m]	
X _{C0}	-4,5	X _{Cn}	6,0	0,5	R ₀	15,29	1
Y _{C0}	10,1	Y _{Cn}	18,1	0,5	R _n	19,29	

Na análise do solo misto, foram consideradas 975 superfícies de pesquisa. Esse número de superfície mais baixo é justificado pelo critério de adoção da malha e raio.

São realizadas ainda análises quanto à sensibilidade dos parâmetros adotados como variáveis aleatórias para a superfície crítica obtida. A partir dela, fixam-se as coordenadas do centro da superfície crítica encontrada e varia-se o raio. O intuito desta análise é verificar a variação do fator de segurança, índice de confiabilidade e influência dos

parâmetros adotados como variáveis aleatórias em função do maciço do solo considerado pela superfície crítica.

3.4.2 Análise da Influência do Coeficiente de Variação das Variáveis Aleatórias

Com base no resultado da análise de superfície crítica, assumiram-se os menores índices de confiabilidade encontrados para cada tipo do solo, de acordo com o método de Equilíbrio Limite tomado como base da análise de confiabilidade. Os valores adotados na análise de superfície crítica foram utilizados como valores médios nas análises de influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias.

Esta análise tenta caracterizar a influência epistêmica, ou seja, relacionada à aquisição de dados. Assumindo um valor maior do coeficiente de variação relaciona-se a consideração de uma maior incerteza. Nesta mesma relação, ao adotar um coeficiente de variação menor, correlacionam-se variáveis aleatórias melhores discretizadas.

A alteração do coeficiente de variação se baseou conforme descrição de Phoon e Kulhawy (1999). Em que os coeficientes de variação máximos e mínimos foram assumidos de acordo com as características dos solos informados por estes autores. Os coeficientes de variação médios foram mantidos os descritos anteriormente para os solos, esses dados podem ser observados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Dados do coeficiente de variação assumido para as variáveis aleatórias.

	ARENOSO				ARGILOSO				MISTO			
	C.V. Médio [%]	C.V. Mín. [%]	C.V. Máx. [%]	FDP	C.V. Médio [%]	C.V. Mín. [%]	C.V. Máx. [%]	FDP	C.V. Médio [%]	C.V. Mín. [%]	C.V. Máx. [%]	FDP
Coesão (c') [kPa]	15	6	56	Log-Normal	24	6	56	Log-Normal	30	11	49	Log-Normal
Ângulo de Atrito (ϕ') [graus]	10	10	50	Log-Normal	21	10	50	Log-Normal	20	10	50	Log-Normal

3.4.3 Análise da Influência da Inclinação da Superfície do Talude

A verificação da influência da inclinação na estabilidade de taludes é analisada para os três solos, conforme referenciado. As superfícies foram discretizadas em 300 lamelas. A malha adotada nesta análise utilizou o critério de avaliação da região crítica, sendo assim, ela variou de acordo com o tipo do solo e de acordo com o ângulo (Θ) da superfície de pesquisa. Os dados da geometria do talude são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Inclinação assumida para verificação de influência da geometria do talude.

Inclinação da Superfície do Talude (Θ) [°]	Projeção Horizontal [m]
30	17,32
35	14,28
40	11,92
45	10,00
50	8,39
55	7,00
60	5,77

As malhas dos solos arenoso, argilosos e mistos são observadas nas Tabela 3.8, 3.9 e 3.10.

Tabela 3.8 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo arenoso.

SOLO ARENOSO								
Inclinação da ST* (Θ) [°]	Range [m]		Escalonado [m]	Raio [m]	Escalonado [m]			
30	Xc ₀	-5,15	Xc _n	25,40	0,5	R ₀	27,60	1
	Yc ₀	-0,15	Yc _n	29,90	0,5	R _n	29,60	
35	Xc ₀	-7,15	Xc _n	24,60	0,5	R ₀	24,25	1
	Yc ₀	-3,65	Yc _n	26,40	0,5	R _n	26,25	
40	Xc ₀	-7,05	Xc _n	18,40	0,5	R ₀	21,20	1
	Yc ₀	-3,05	Yc _n	22,40	0,5	R _n	23,20	
45	Xc ₀	-7,30	Xc _n	17,20	0,5	R ₀	17,20	1
	Yc ₀	2,70	Yc _n	21,20	0,5	R _n	21,20	
50	Xc ₀	-7,30	Xc _n	17,20	0,5	R ₀	17,20	1
	Yc ₀	2,70	Yc _n	21,20	0,5	R _n	21,20	
55	Xc ₀	-9,9	Xc _n	14,20	0,5	R ₀	16,90	1
	Yc ₀	-6,4	Yc _n	16,20	0,5	R _n	18,90	
60	Xc ₀	-15,25	Xc _n	17,30	0,5	R ₀	22,45	1
	Yc ₀	-12,25	Yc _n	20,30	0,5	R _n	24,45	

ST* - Superfície do Talude

Tabela 3.9 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo predominantemente argiloso.

SOLO ARGILOSO								
Inclinação da ST* (Θ) [°]	Range [m]				Escalonado [m]	Raio [m]		Escalonado [m]
30	Xc ₀	5,50	Xc _n	13,85	0,5	R ₀	18,6	1
	Yc ₀	8,50	Yc _n	17,85	0,5	R _n	20,6	
35	Xc ₀	4,10	Xc _n	12,50	0,5	R ₀	14,95	1
	Yc ₀	7,10	Yc _n	16,50	0,5	R _n	16,95	
40	Xc ₀	1,60	Xc _n	11,20	0,5	R ₀	11,65	1
	Yc ₀	5,10	Yc _n	16,70	0,5	R _n	15,65	
45	Xc ₀	1,60	Xc _n	11,20	0,5	R ₀	11,65	1
	Yc ₀	5,10	Yc _n	16,70	0,5	R _n	15,65	
50	Xc ₀	-2,40	Xc _n	11,20	0,5	R ₀	11,65	1
	Yc ₀	5,10	Yc _n	17,70	0,5	R _n	15,65	
55	Xc ₀	-2,40	Xc _n	11,20	0,5	R ₀	11,65	1
	Yc ₀	5,10	Yc _n	17,70	0,5	R _n	15,65	
60	Xc ₀	-2,40	Xc _n	11,20	0,5	R ₀	11,65	1
	Yc ₀	5,10	Yc _n	17,70	0,5	R _n	15,65	

ST* - Superfície do Talude

Tabela 3.10 – Dados da malha adotada para análise da inclinação de um talude de solo misto.

SOLO MISTO								
Inclinação da ST* (Θ) [°]	Range [m]				Escalonado [m]	Raio [m]		Escalonado [m]
30	Xc ₀	-0,35	Xc _n	20,25	0,5	R ₀	22,25	1
	Yc ₀	3,15	Yc _n	24,25	0,5	R _n	24,25	
35	Xc ₀	-1,50	Xc _n	10,10	0,5	R ₀	15,29	1
	Yc ₀	4,00	Yc _n	18,10	0,5	R _n	19,29	
40	Xc ₀	-3,00	Xc _n	10,10	0,5	R ₀	15,29	1
	Yc ₀	4,00	Yc _n	18,10	0,5	R _n	19,29	
45	Xc ₀	-4,50	Xc _n	10,10	0,5	R ₀	15,29	1
	Yc ₀	6,00	Yc _n	18,10	0,5	R _n	19,29	
50	Xc ₀	-4,50	Xc _n	10,10	0,5	R ₀	15,29	1
	Yc ₀	3,50	Yc _n	18,10	0,5	R _n	19,29	
55	Xc ₀	-5,55	Xc _n	12,00	0,5	R ₀	13,35	1
	Yc ₀	-3,05	Yc _n	14,00	0,5	R _n	15,35	
60	Xc ₀	-5,41	Xc _n	12,10	0,5	R ₀	12,90	1
	Yc ₀	-6,41	Yc _n	13,10	0,5	R _n	14,90	

ST* - Superfície do Talude

As inclinações assumidas para essas análises podem ser observadas conforme Figura 3.7.

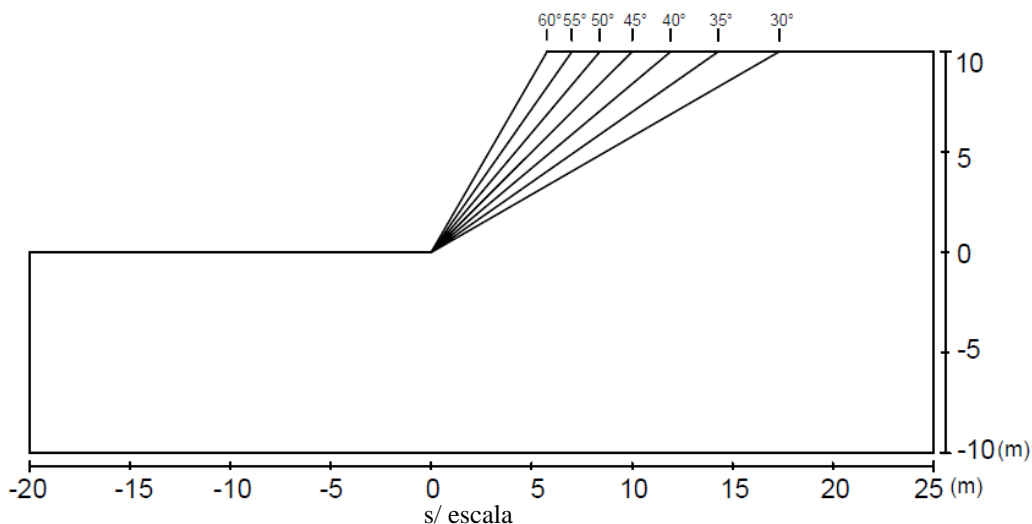


Figura 3.7 – Inclinação assumida para verificação de influência da geometria do talude.

O intuito principal da análise é estabelecer uma inclinação segura através do método probabilístico, com base na Tabela 2.2 do U.S. Army Corps of Engineers (1995), a qual descreve os níveis aceitáveis de índice de confiabilidade.

3.4.4 Análise da Influência da Posição do Nível d'Água no Talude

Com o intuito de avaliar a influência da elevação da cota do nível d'água na questão da segurança, foram realizadas análises variando-se a posição do nível d'água desde cotas inferiores da superfície crítica até a cota máxima coincidente com a altura do talude. Esta análise justifica-se quando existe precipitação elevada, proporcionando enchimento rápido do talude, geralmente, causada por obstrução dos equipamentos de drenagem. Este cenário ocorre geralmente em taludes de cortes compostos de solo natural.

A avaliação de segurança em função do nível d'água independentemente da posição, não considerada a existência de fluxo. A análise foi realizada em um talude idealizado com altura igual a 10 metros e o ângulo de inclinação da superfície do talude de 45°, o número de lamela adotado foi de 300, conforme observado na Figura 3.8.

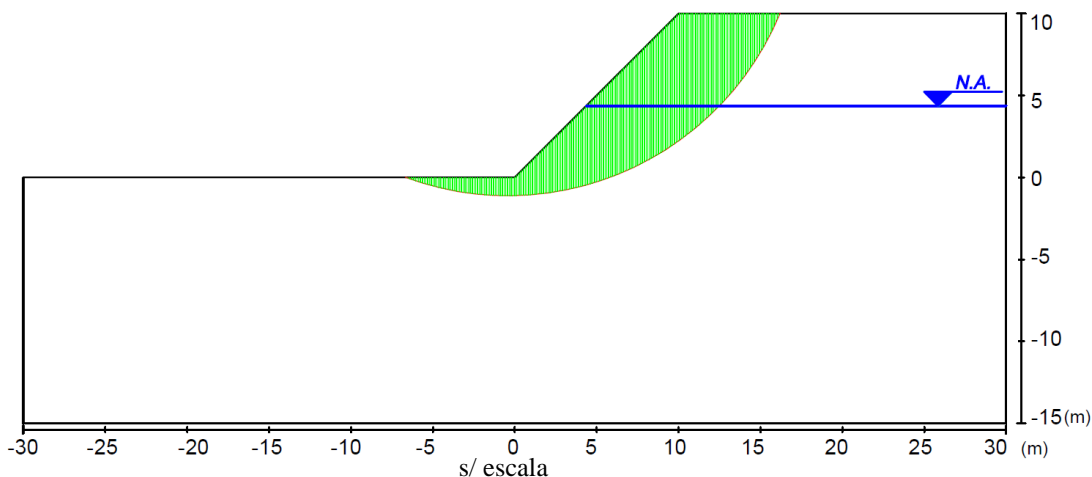


Figura 3.8 – Talude idealizado para as análises de superfície crítica.

A superfície de pesquisa, considerada como crítica adotada para esta análise baseou-se na possibilidade de avaliação de todas as cotas analisadas do nível d'água. Sendo assim, a superfície adotada pode não ser a real superfície crítica. A coordenada da superfície utilizada nesta análise é descrita conforme Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Superfície adotada para análise de elevação do nível d' água.

Superfície Crítica [m]		Raio [m]	
Xc	-0,6	Yc	11,3
			12,8

A posição do nível d'água ocorreu da cota -2m até a cota 10m (superfície do talude), variando de metro em metro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Superfície Crítica do Talude

A análise de superfície crítica foi realizada para taludes com diferentes solos, foram aplicados os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Janbu Generalizado. A análise procurou encontrar as superfícies críticas para cada tipo de solo com o respectivo método em que ele foi analisado. Os resultados são apresentados com uma breve discussão acerca do obtido.

As superfícies críticas encontradas para cada respectivo solo são observadas conforme Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3.

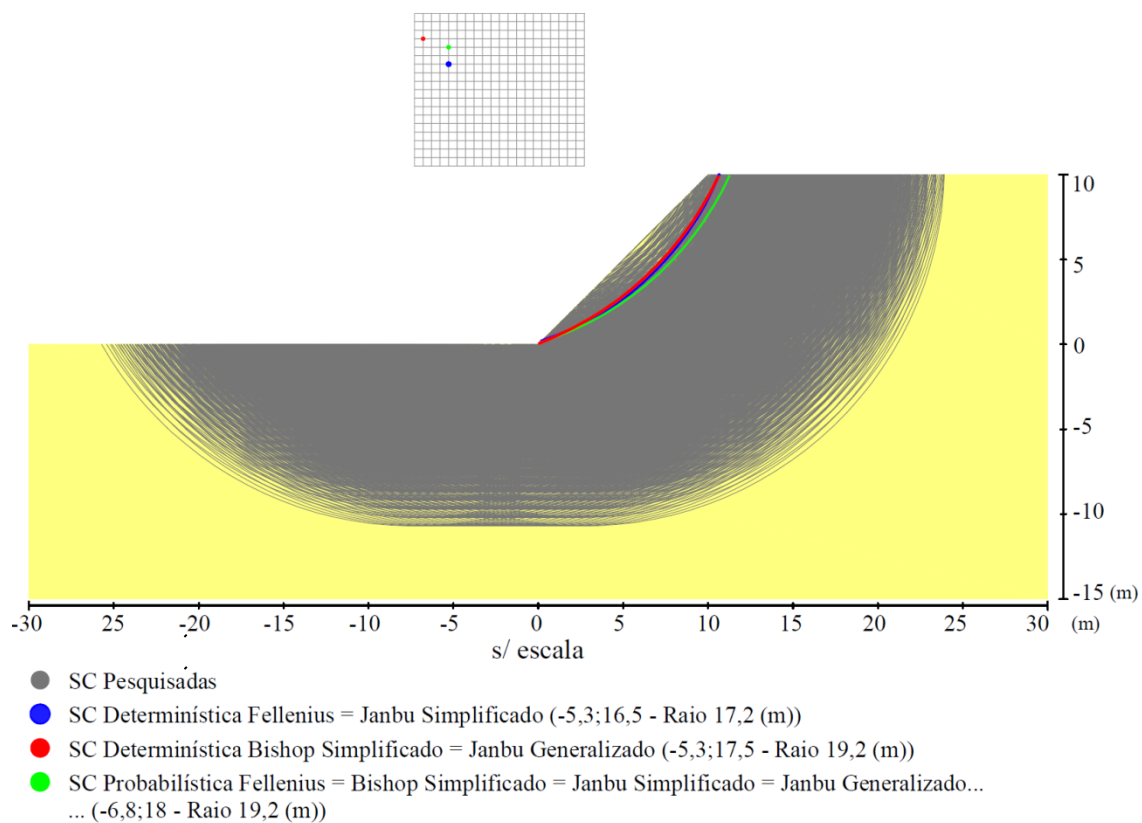


Figura 4.1 – Análise da superfície crítica: Solo arenoso.

Onde: (SC) é a superfície crítica avaliada de acordo com o método de Equilíbrio Limite assumido em sua respectiva análise (determinística e probabilística).

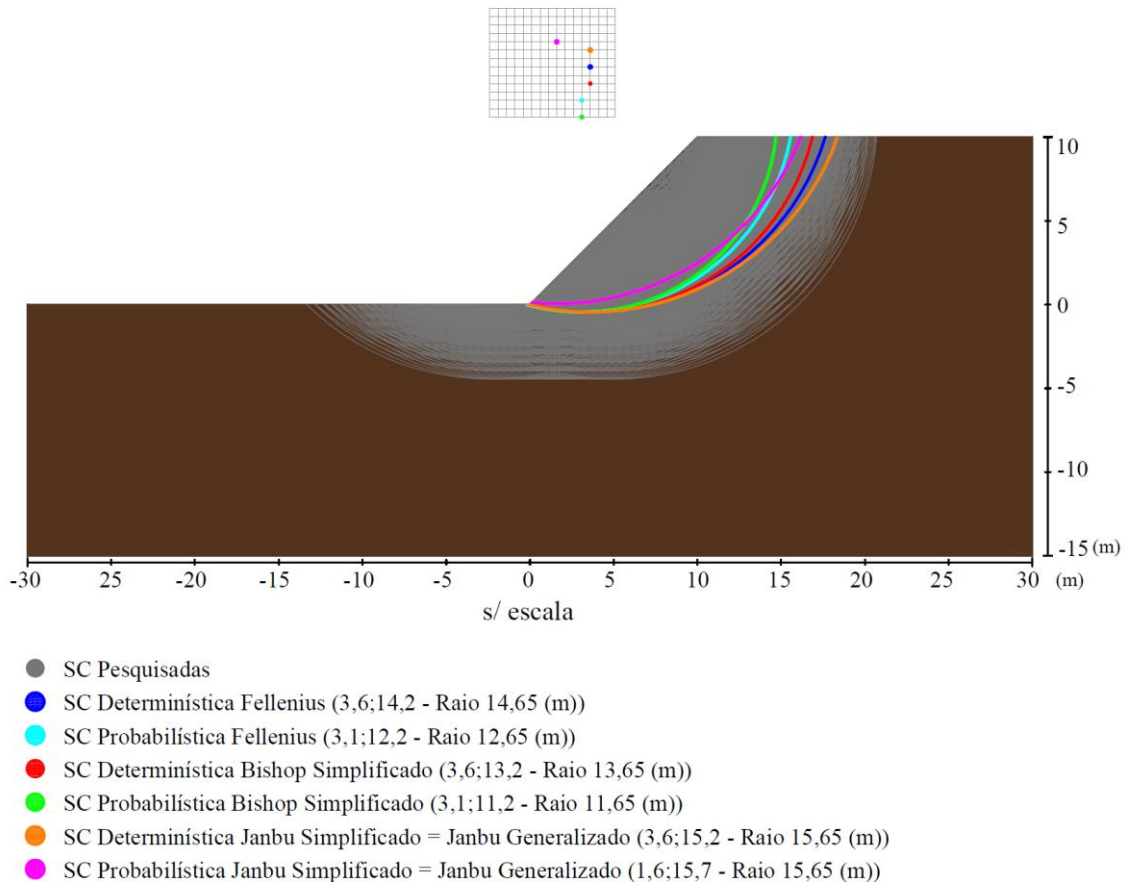


Figura 4.2 – Análise da superfície crítica: Solo argiloso.

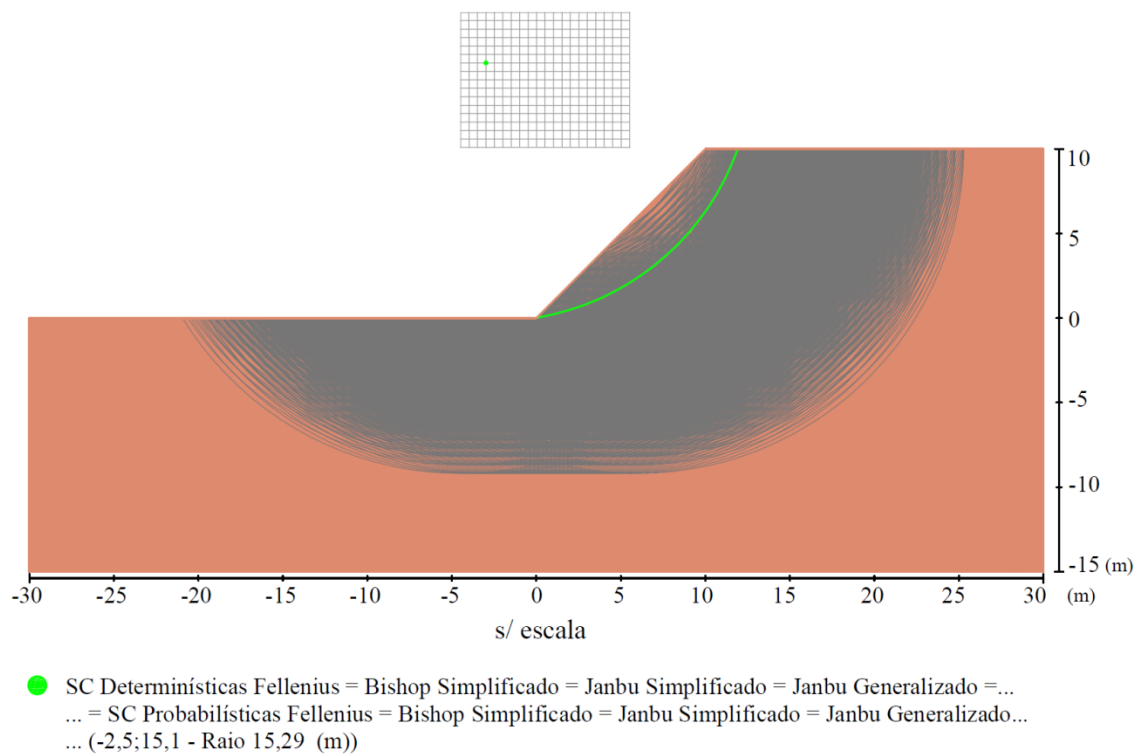


Figura 4.3 – Análise da superfície crítica: Solo misto.

Como é possível observar na Figura 4.1 (solo arenoso), as superfícies críticas para os métodos determinísticos (Fellenius e Bishop Simplificado) apesar de serem próximas, não são as mesmas. Isso também ocorre quando comparamos a superfície crítica probabilística com as determinísticas.

As análises de superfície crítica realizadas para o talude idealizado com solo argiloso demonstram superfícies críticas divergindo devido aos parâmetros de resistência e coeficientes de variação adotados para este solo.

Tanto para o solo arenoso quanto para o argiloso, assume-se que isto ocorre devido ao alto valor de coeficiente de variação adotado, conforme observado em Chowdhury e Xu (1994). Nesses casos, é verificado que as superfícies críticas que apresentam os menores fatores de segurança, podem não ser as superfícies com a maior probabilidade de falha.

Para o talude de solo misto, as superfícies críticas analisadas tanto para as análises determinísticas quanto para as probabilísticas foram as mesmas. De modo que as influências do método de Equilíbrio Limite adotado para ambas as análises e os coeficientes de variações são similares, assim, a superfície crítica convergiu no mesmo ponto para todas as análises.

Os valores do fator de segurança, índices de confiabilidade e suas respectivas probabilidades de falha encontradas para superfícies críticas referentes aos métodos de Equilíbrio Limite podem ser observados na Tabela 4.1. Vale ressaltar que as superfícies críticas referentes aos valores críticos de fator de segurança e índice de confiabilidade são descritos conforme Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3.

Tabela 4.1 – Resultados de segurança do talude para as análises determinísticas e probabilísticas.

Solo	Método	FS	β	P_f
Arenoso	Fellenius	1,455	3,195	0,070%
	Bishop Simplificado	1,519	3,640	0,014%
	Janbu Simplificado	1,447	3,146	0,083%
	Janbu Generalizado	1,563	3,890	0,005%
Argiloso	Fellenius	1,954	3,293	0,050%
	Bishop Simplificado	1,968	3,348	0,041%
	Janbu Simplificado	1,994	3,330	0,043%
	Janbu Generalizado	2,144	3,696	0,011%
Misto	Fellenius	1,151	0,600	27,424%
	Bishop Simplificado	1,207	0,866	19,331%
	Janbu Simplificado	1,141	0,550	29,104%
	Janbu Generalizado	1,238	1,004	15,761%

As análises probabilísticas por meio do FORM possibilita a avaliação da influência das variáveis aleatórias assumidas nas análises. As influências das variáveis aleatórias através das análises probabilísticas com base nos métodos de Equilíbrio Limite são observadas conforme Figura 4.4 (solo arenoso), Figura 4.5 (solo argiloso) e Figura 4.6 (solo misto).

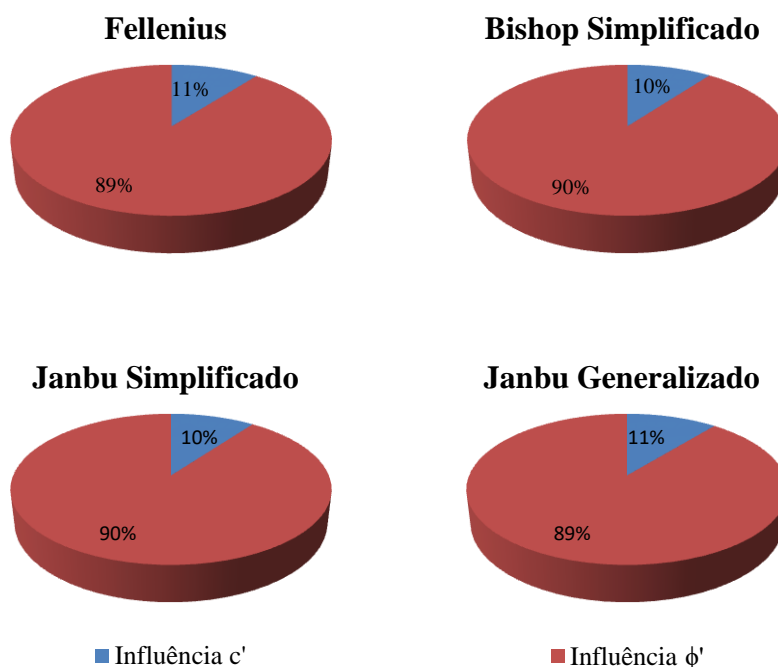


Figura 4.4 – Influência das variáveis aleatórias: Solo arenoso.

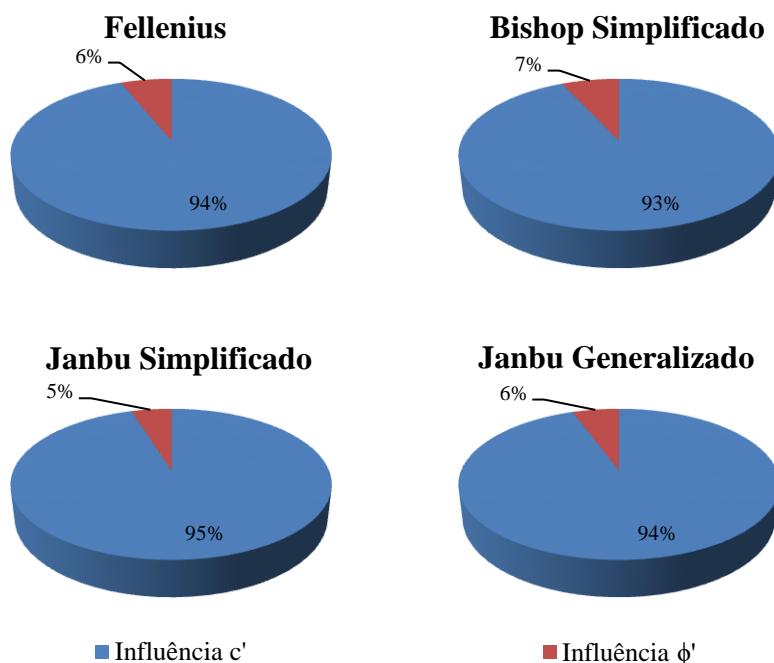


Figura 4.5 – Influência das variáveis aleatórias: Solo argiloso.

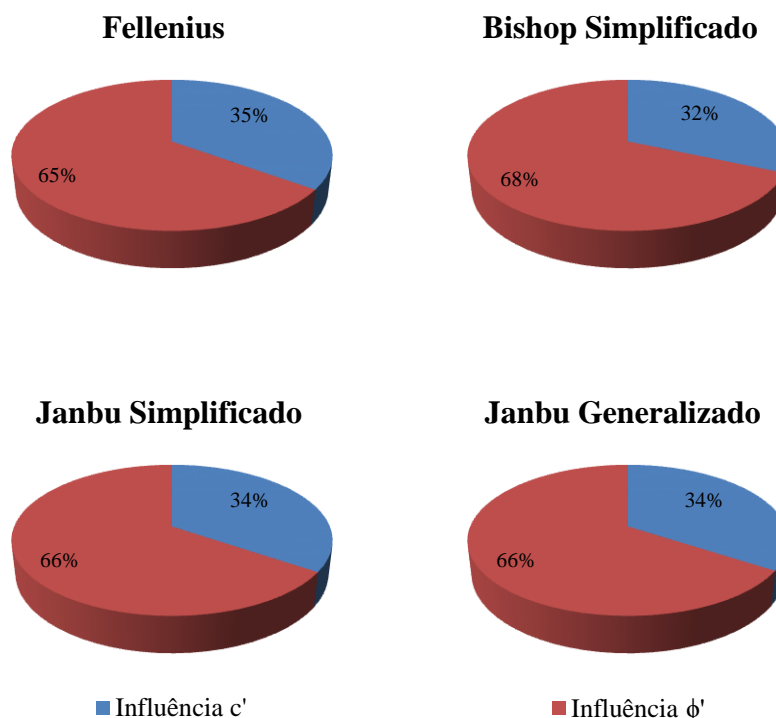


Figura 4.6 – Influência das variáveis aleatórias: Solo misto.

Conforme demonstrado na Figura 4.4, a influência do ângulo de atrito no solo arenoso como parâmetro de resistência é mais significativa do que a coesão. Isto é devido a maior fração do parâmetro de resistência de ângulo de atrito no solo arenoso.

Para o solo argiloso, como era esperado, a influência que predomina é a da coesão, independentemente do método de Equilíbrio Limite adotado na análise. Isto ocorre, pois, os parâmetros de resistências no solo assumido como argiloso, a coesão contém um valor mais significativo (alto) do que o ângulo de atrito.

Na análise de influência realizada para o solo misto (Figura 4.6), os valores de influência dos parâmetros de resistência apresentaram-se próximos. O resultado reflete em termos os valores médios de parâmetros de resistência assumidos para o solo misto.

Através da análise de superfície crítica é possível avaliar os resultados obtidos de maneira determinísticas. Com isso verificam-se os fatores de segurança fornecidos pelos métodos de Equilíbrio Limite de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Janbu Generalizado. A Figura 4.7 demonstra os valores dos fatores de segurança dispostos graficamente.

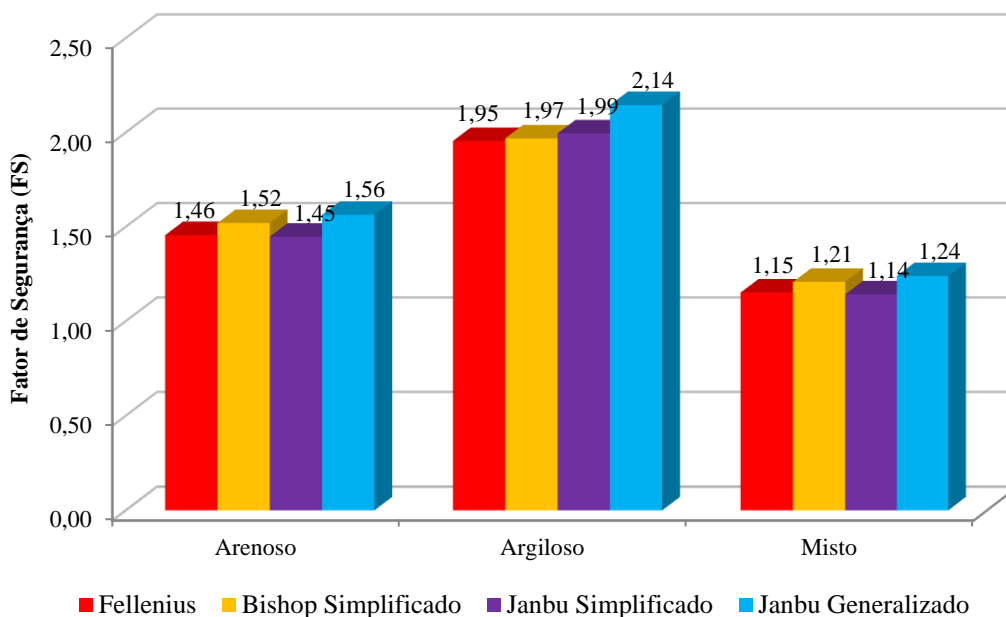


Figura 4.7 – Fator de segurança da superfície crítica.

Levando em consideração os métodos de Equilíbrio Limite analisados é possível verificar que o método de Janbu Generalizado independente do solo analisado fornece o maior valor de fator de segurança. Já as avaliações da segurança realizada pelos métodos de Fellenius e Janbu Simplificado tendem a serem mais conservadores. O método de Bishop Simplificado fornece valores intermediários.

Para as análises de influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias, influência da inclinação e influência da posição do nível d'água foram assumidos somente o método de Equilíbrio Limite de Fellenius e de Bishop Simplificado. O critério de escolha desses métodos é a adoção de um método mais conservador (Fellenius) e de um método mais usual na literatura como Bishop Simplificado (LI *et al.*, 2015a); (LUO *et al.*, 2016); (JIANG; HUANG, 2016); (ZHANG; HUANG, 2016).

A partir das superfícies críticas encontradas nas análises probabilísticas, variou-se o raio mantendo as coordenadas do centro destas superfícies. Esta variação foi realizada com intuito de observar o comportamento do fator de segurança e o índice de confiabilidade em função da massa de solo considerada pelas superfícies críticas. Uma exemplificação desta análise é a aplicação desta avaliação quando se determina em projeto a substituição do solo de fundações de taludes, ou até mesmo construções de bermas em função do favorecimento da segurança de taludes. Visto que em casos deste tipo a superfície crítica tende a considerar maciços de solos maiores.

As análises da variação do raio mantendo as coordenadas do centro das superfícies críticas podem ser observadas de acordo com a Figura 4.8, Figura 4.10 e Figura 4.12.

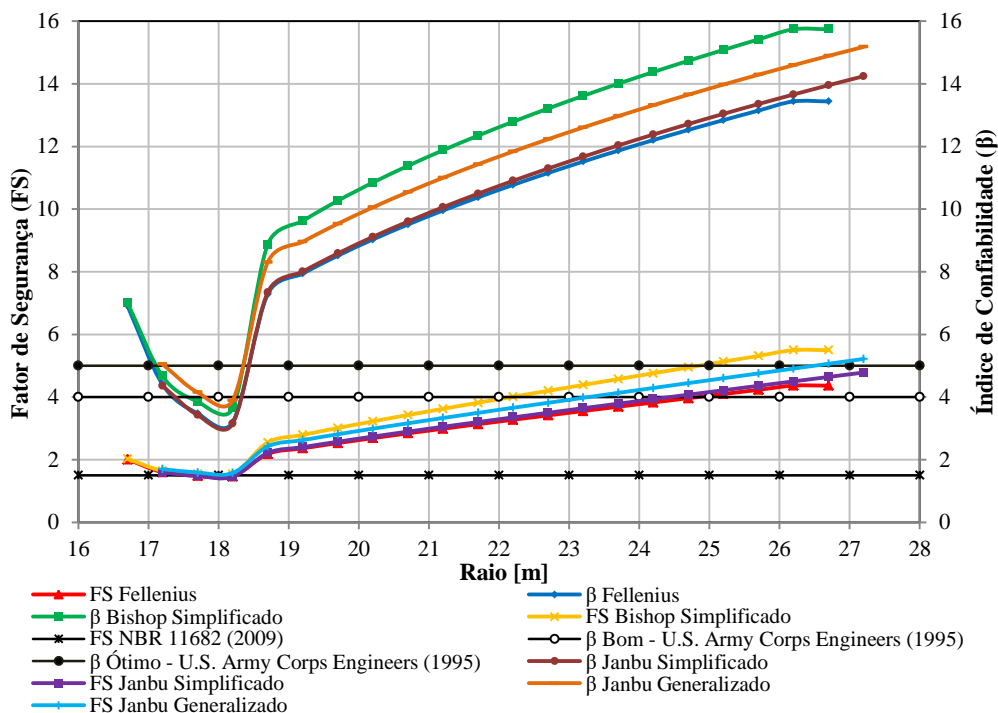


Figura 4.8 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo arenoso.

Através da análise de variação do raio pode-se verificar a influência das variáveis aleatórias dos solos adotados para esta análise. Esta análise para o solo arenoso é apresentada de acordo com a Figura 4.9.

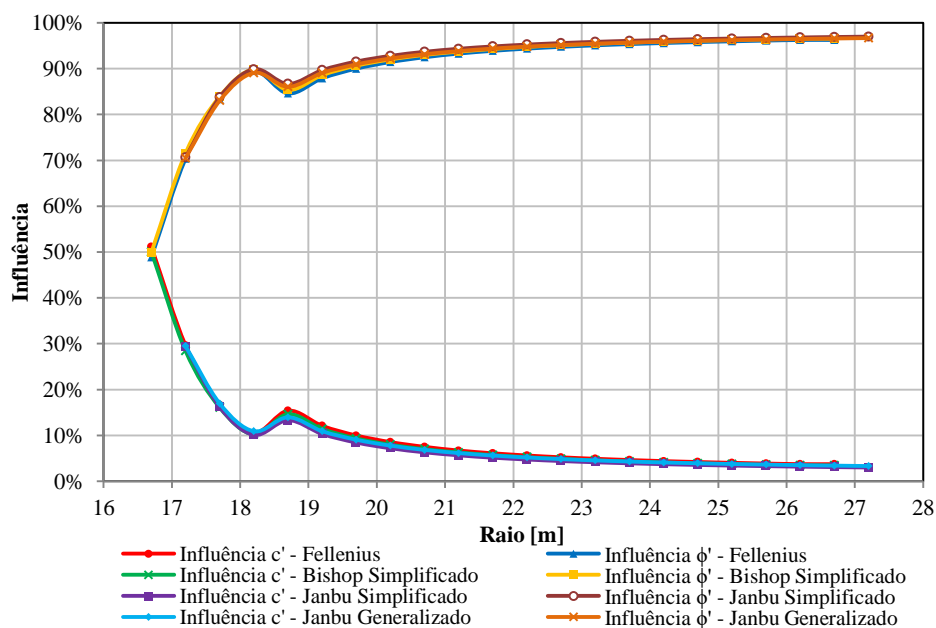


Figura 4.9 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo arenoso.

Os dados que seguem referem-se ao talude idealizado de solo argiloso.

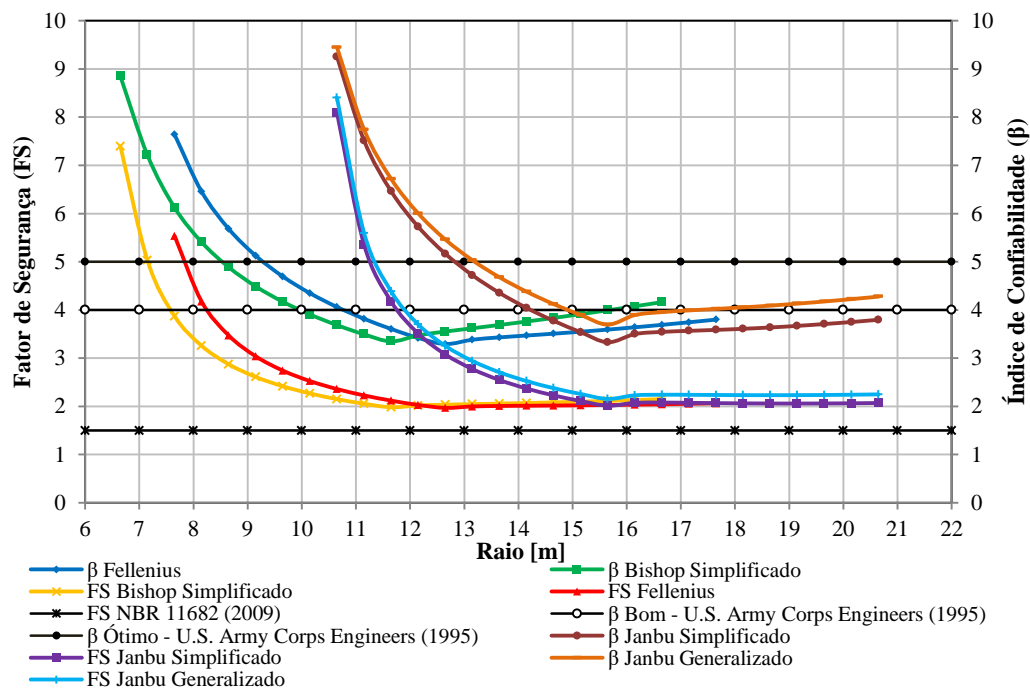


Figura 4.10 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo argiloso.

A verificação da influência dos parâmetros de resistência em função do raio para o talude idealizado de solo argiloso é observada na Figura 4.11.

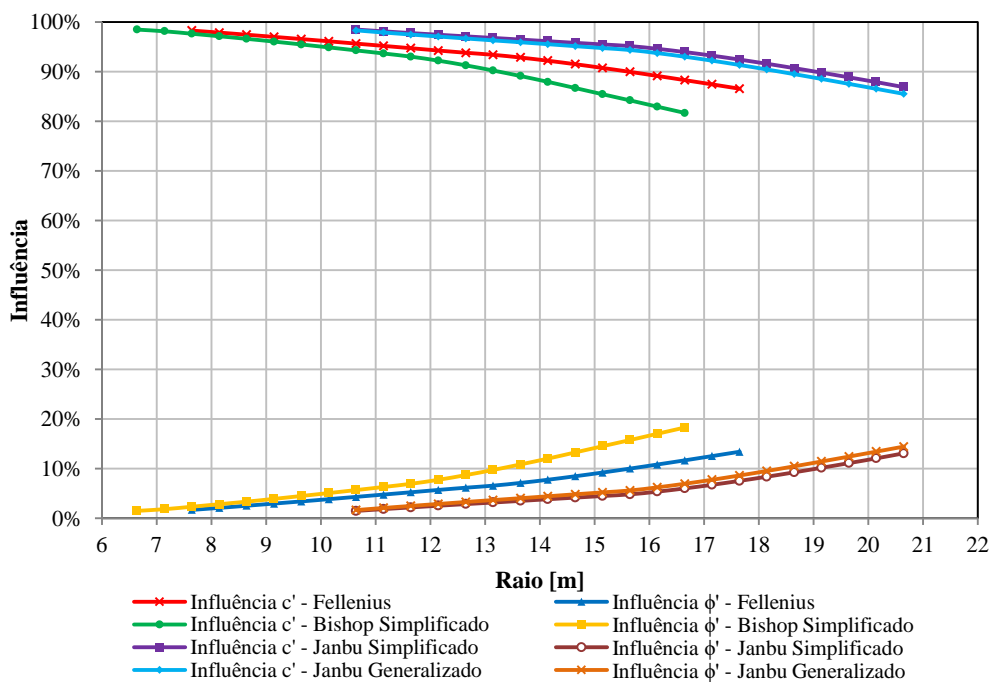


Figura 4.11 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo argiloso.

As análises a seguir fazem referência ao talude idealizado de solo misto.

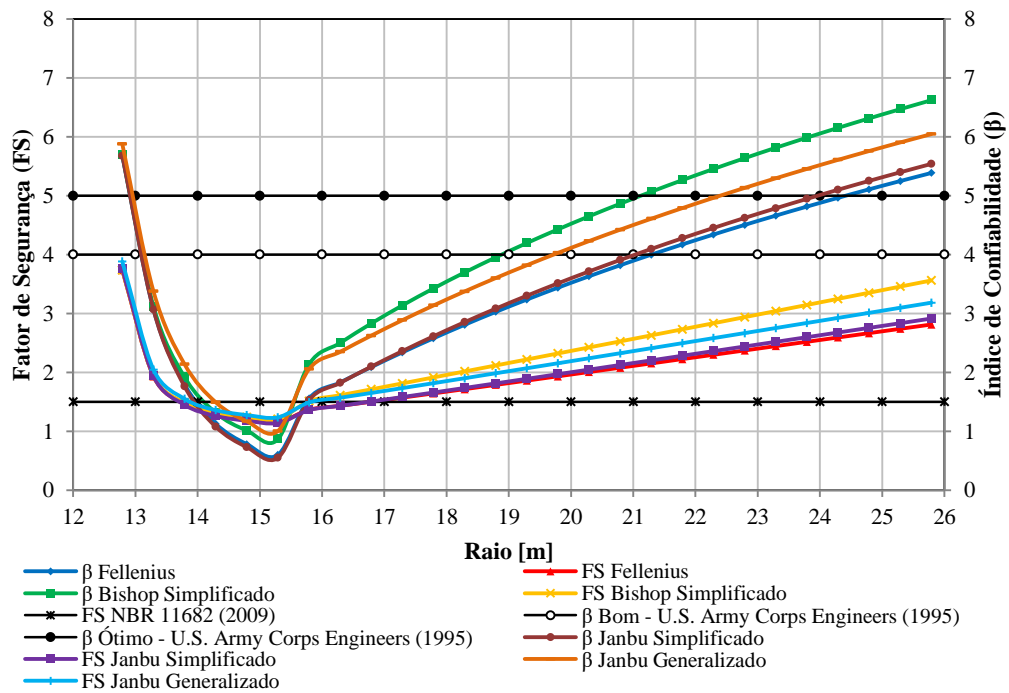


Figura 4.12 – Fator de segurança e índice de confiabilidade em relação ao raio: Solo misto.

A influência das variáveis aleatórias em função do raio para o talude idealizado de solo misto é verificada na Figura 4.13.

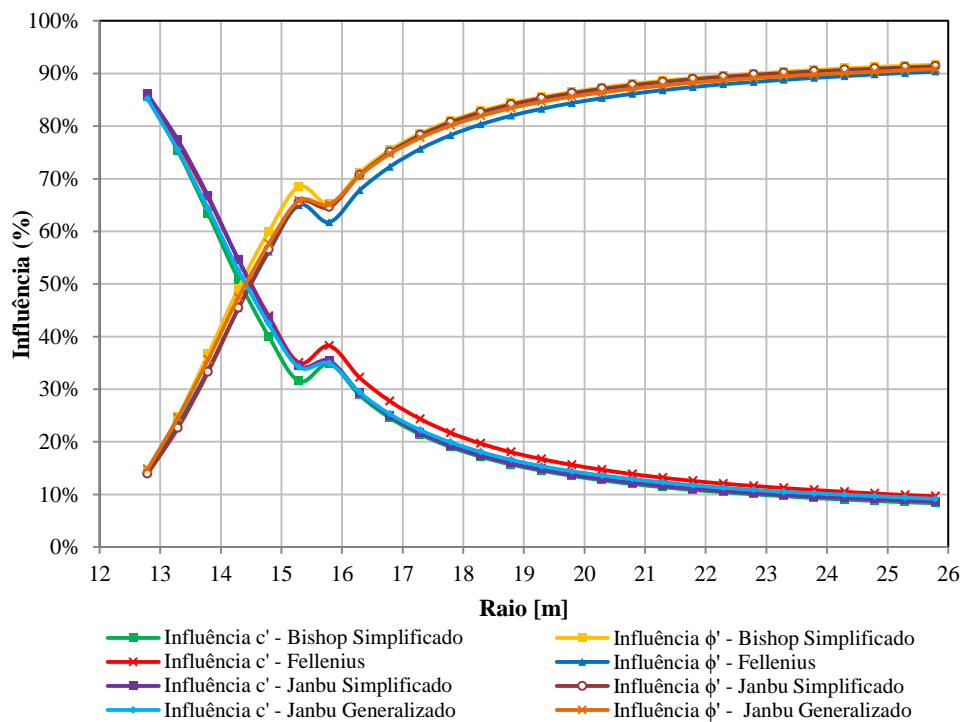


Figura 4.13 – Influência das variáveis aleatórias em função do raio: Solo misto.

As análises de variação do raio consideraram as superfícies críticas em função do índice de confiabilidade. Sendo assim, podemos observar que para os taludes de solo arenoso e argiloso, o raio crítico das análises probabilísticas não são as mesmas das encontradas nas análises determinísticas. Para o talude de solo misto estas superfícies são as mesmas.

Os valores de referência adotados como aceitáveis para a análise de variação do raio foram assumidos de acordo com a norma brasileira NBR 11682 (2009) para a análise determinística. E a tabela de valores de índice de confiabilidade e probabilidade de falha alvo é fornecida pelo U.S. Army Corps of Engineers (1995). Para a análise determinística o valor mínimo aceitável é de fator de segurança de 1,5 e, para a análise probabilística, o valor mínimo aceitável é de índice de confiabilidade de 4,0 (considerado bom).

Na análise de variação do raio do talude do solo arenoso, conforme Figura 4.8, observa-se que a superfície crítica ao redor do raio de 18m apresenta um fator de segurança um pouco abaixo do aceitável e, em alguns pontos, coincidindo com o valor aceitável. Porém, nessa região os valores de índice de confiabilidade apresentam-se abaixo do aceitável (β bom).

Na Figura 4.10, a partir da variação do raio para o talude de solo argiloso, verificou-se que mesmo as análises determinísticas fornecendo valores muito acima do aceitável, o índice de confiabilidade a partir do raio entre 10 e 11 para as análises com base em Fellenius e Bishop Simplificado, e 14 e 15 para as análises de Janbu Simplificado e Janbu Generalizado, não fornecem valores aceitáveis. Esta situação é verificada ainda nesta mesma análise realizada para o solo misto, conforme Figura 4.12.

Na influência das variáveis aleatórias do talude de solo arenoso, conforme Figura 4.9, observa-se que a influência do ângulo de atrito com superfícies críticas de pesquisa localizadas mais próximas à superfície do talude tende a ser igual à influência da coesão. Porém, quando os raios crescem, a influência do ângulo de atrito prevalece, ficando com valores próximos a 95% de influência.

Ao contrário do observado para o solo arenoso, na análise realizada para o talude de solo argiloso, a influência da variável que predomina é a coesão. Isto ocorre de modo constante, o qual em certos pontos alcança valores de influência muito próximos a 100%.

Para o talude de solo misto, as variáveis aleatórias apresentam inversão de influência na estabilidade do talude. Inicialmente, com raios menores, apresentando uma superfície crítica mais próxima à superfície do talude, a influência da coesão mostra-se

dominante quanto à resistência. Porém, quando os raios vão aumentando, acontece inversão da influência.

4.2 Análise da Influência do Coeficiente de Variação das Variáveis Aleatórias

A avaliação da influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias baseou-se na superfície crítica encontrada para os solos arenoso, argiloso e misto da análise anterior. Foi assumido o coeficiente de variação utilizado na análise anterior como o coeficiente médio, com isso, adotou-se um coeficiente de menor e maior valor conforme Phoon e Kulhawy (1999). A realização desta análise justifica-se em função da avaliação da influência das incertezas epistêmicas, ou seja, referente a qualidade da aquisição de dados quanto a segurança do talude.

A variação dos coeficientes de variação das variáveis aleatórias dos solos arenoso, argiloso e misto através da análise probabilística com base nos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado é observada conforme a Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16.

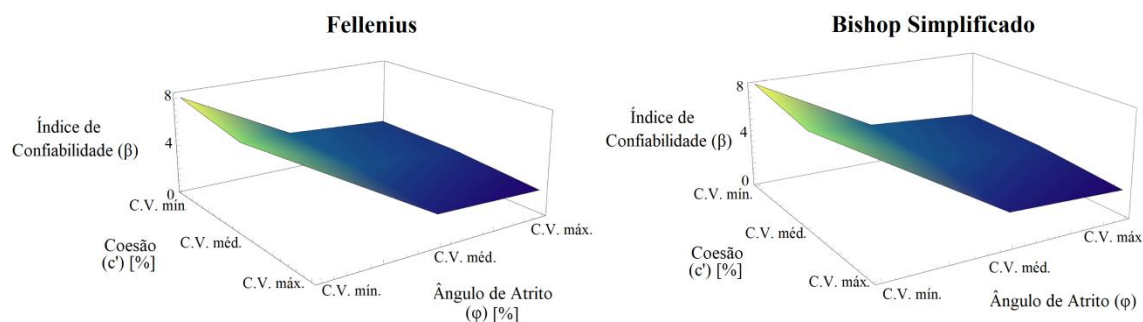


Figura 4.14 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo arenoso.

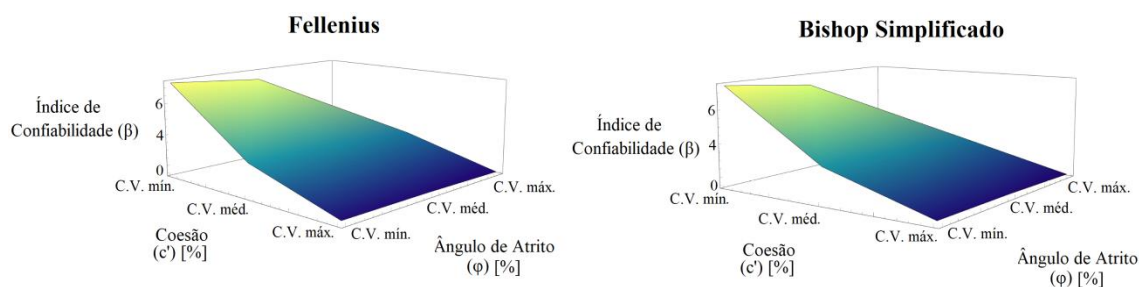


Figura 4.15 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo argiloso.

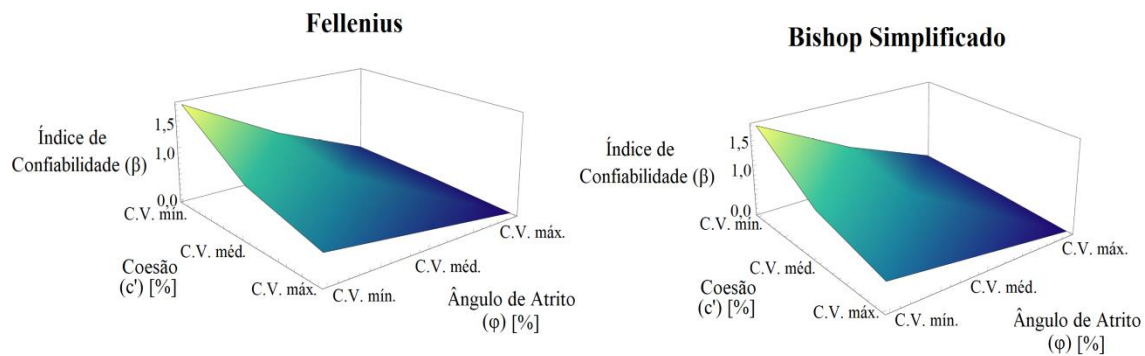


Figura 4.16 – Influência do coeficiente de variação das variáveis aleatórias para solo misto.

A partir das Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 assume-se um plano considerando os coeficientes de variação mínimos, médios e máximos das duas variáveis aleatórias, apresentado nos gráficos conforme Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19.

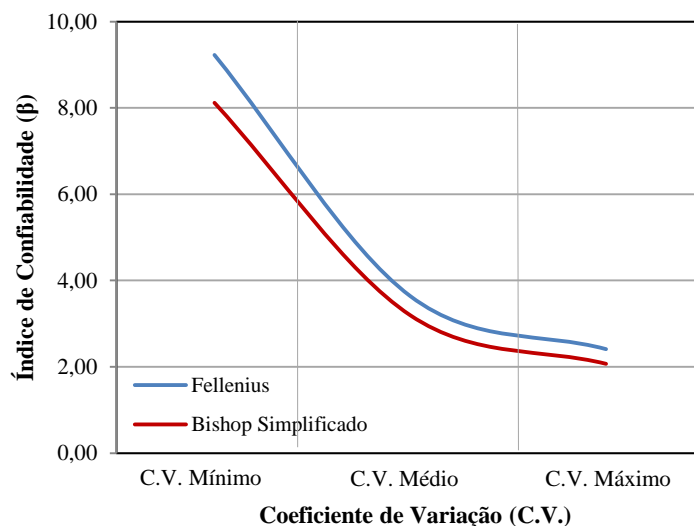


Figura 4.17 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo arenoso.

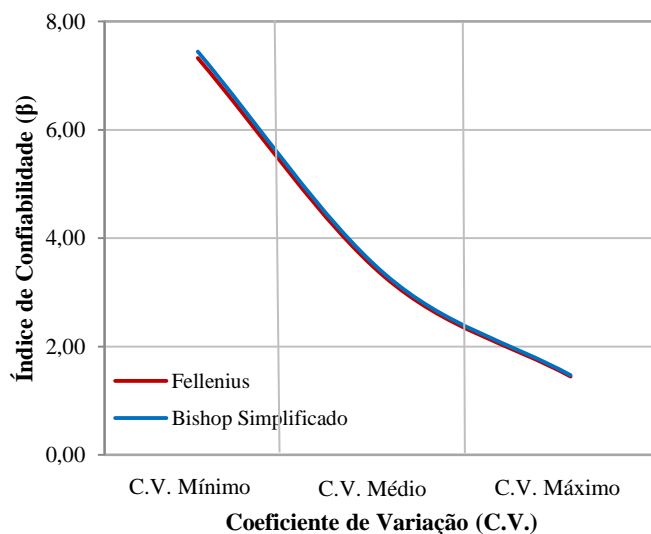


Figura 4.18 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo argiloso.

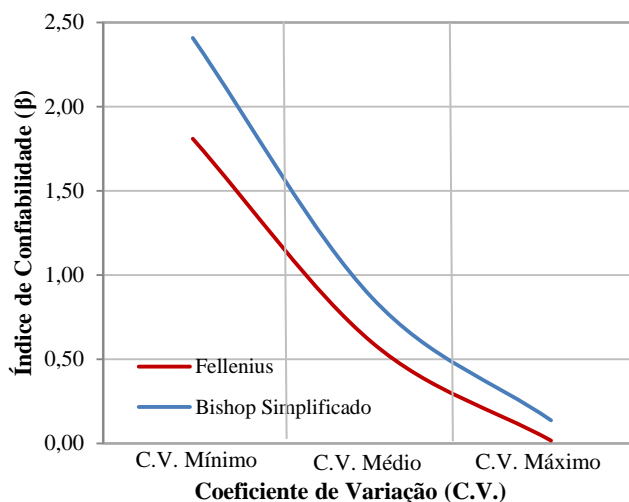


Figura 4.19 – Coeficiente de variação em função do índice de confiabilidade: Solo misto.

É possível observar um comportamento semelhante para os taludes idealizados com os solos arenoso, argiloso e misto, onde existe uma tendência de redução do índice de confiabilidade conforme ocorre um aumento do coeficiente de variação. Associa-se este aumento de probabilidade de falha ao aumento das incertezas epistêmicas, sendo assim, quanto melhor for à aquisição de dados menor é a probabilidade de falha. Vale ressaltar que as incertezas intrínsecas não podem ser melhoradas, visto que essas são inerentes a variabilidade existente no solo.

O comportamento da curva em relação aos métodos de Equilíbrio Limite adotados (Fellenius e Bishop Simplificado) é similar para os solos arenoso, argiloso e misto. Visto que os valores de índice de confiabilidade para o método de Bishop Simplificado apresentam-se maiores, isto se justifica devido ao método de Fellenius tender a fornecer resultados mais conservadores.

4.3 Análise da Influência da Inclinação da Superfície do Talude

A análise de influência da inclinação quanto a segurança do talude baseou-se nos critérios adotados nos casos em que são realizadas obras de terra que abatem a inclinação da superfície de taludes. Pretende-se com isso encontrar uma inclinação que satisfaça o equilíbrio do talude, ou seja, que o talude encontre-se seguro. Obras deste caráter são usais em rodovias, na construção civil e em outras diversas áreas da Engenharia Civil.

As análises consideraram as malhas diferentes para cada inclinação de superfície do talude avaliado com o respectivo solo, isto com o intuito da verificação da região mais propensa a ruptura. As análises foram realizadas através dos métodos de Equilíbrio Limite

de Fellenius e Bishop Simplificado. Os resultados são demonstrados em função das inclinações, as superfícies probabilísticas críticas dos solos arenoso, argiloso e misto são observados nas respectivas Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22.

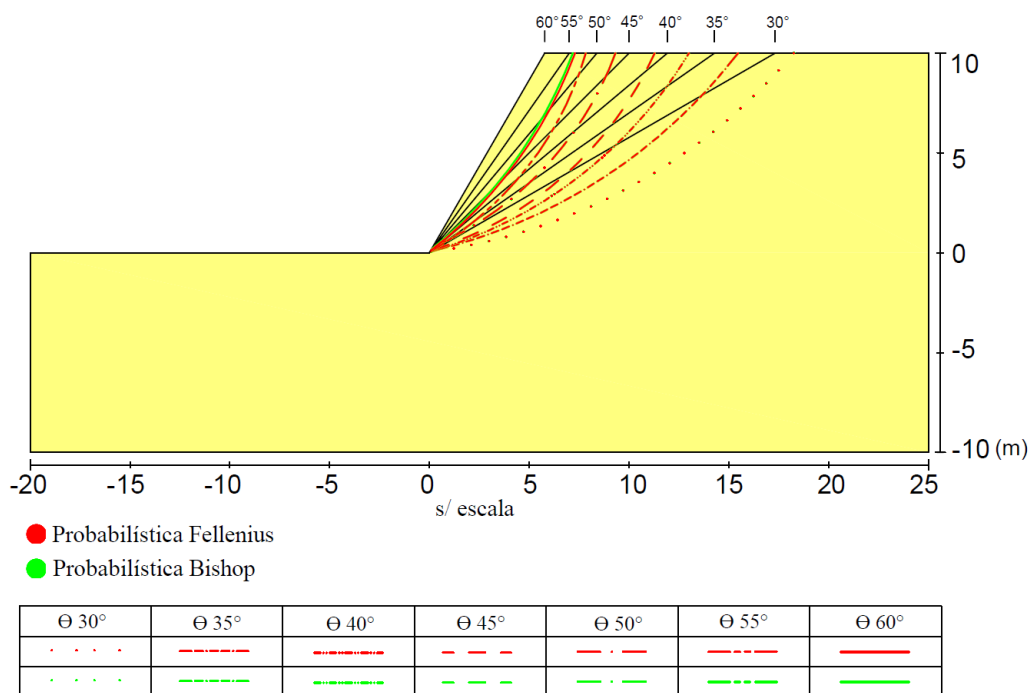


Figura 4.20 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo arenoso.

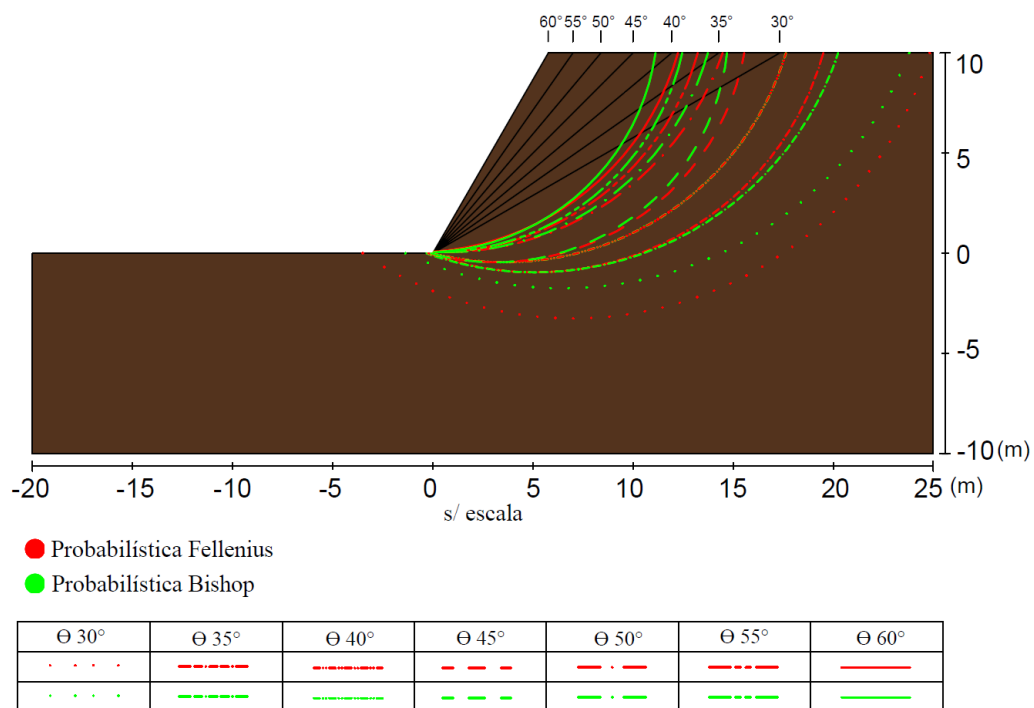


Figura 4.21 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo argiloso.

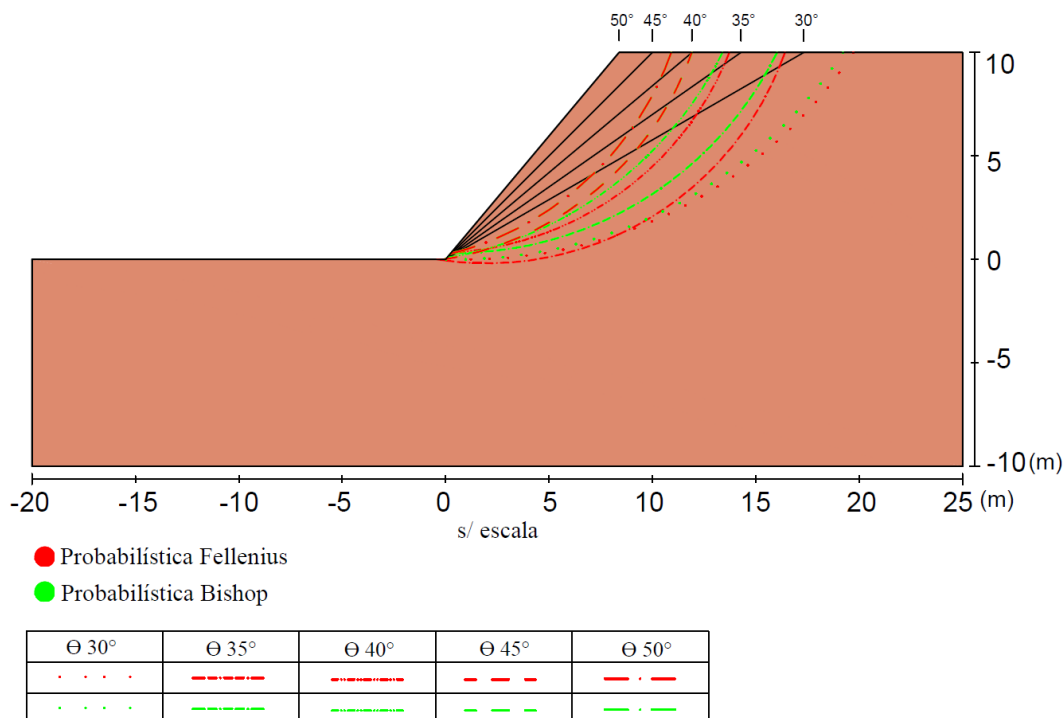


Figura 4.22 – Análise da Influência da inclinação em relação ao índice de confiabilidade: Solo misto.

Em função da complementação do observado nas Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22, a Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos através da análise probabilística juntamente com as respectivas coordenadas.

Tabela 4.2 – Análise de inclinação: Índice de confiabilidade e coordenadas da superfície crítica.

Solo Arenoso - Análise Probabilística de Fellenius							
Inclinação [graus]	30	35	40	45	50	55	60
B	7,5232	5,9957	4,4902	3,1949	2,1114	1,0084	0,1834
Coordenada (Xc;Yc);	(-3,5; 28,4);	(-6,15; 26,6);	(-6,41; 21,4);	(-5,3; 17,5);	(-6,8; 16,0);	(-8,4; 14,7);	(-13,75; 17,8);
Raio [m]	28,6	27,25	22,2	18,2	17,2	16,9	22,45
Solo Arenoso - Análise Probabilística de Bishop Simplificado							
B	7,8315	6,281	4,8437	3,6396	2,5244	1,4092	0,4104
Coordenada (Xc;Yc);	(-3,5; 28,4);	(-6,2; 26,6);	(-6,1; 21,4);	(-5,3; 17,5);	(-6,8; 16,0);	(-8,4; 14,7);	(-14,75; 18,3);
Raio [m]	28,6	27,25	22,2	18,2	17,2	16,9	23,45
Solo Argiloso - Análise Probabilística de Fellenius							
B	4,1044	3,8175	3,5198	3,2925	3,0276	2,7671	2,5359
Coordenada (Xc;Yc);	(7,0; 15,35);	(5,1; 14,0);	(3,6; 14,2);	(3,1; 12,2);	(0,6; 14,7);	(0,1; 13,7);	(-0,9; 13,7);
Raio [m]	18,6	14,95	14,65	12,65	14,65	13,65	13,65
Solo Argiloso - Análise Probabilística de Bishop Simplificado							
B	4,3292	3,9557	3,6106	3,3477	3,0448	2,7883	2,4733
Coordenada (Xc;Yc);	(6,5; 16,85);	(5,1; 15,0);	(3,6; 14,2);	(3,1; 11,2);	(0,6; 13,7);	(0,1; 12,7);	(-0,4; 11,7);
Raio [m]	18,6	15,95	14,65	11,65	13,65	12,65	11,65
Solo Misto - Análise Probabilística de Fellenius							
B	2,5635	1,8389	1,2211	0,6001	0,1809		
Coordenada (Xc;Yc);	(1,15; 22,25);	(2,0; 15,1);	(-0,5; 15,6);	(-2,5; 15,1);	(-3,5; 15,1);		
Raio [m]	22,25	15,29	15,29	15,29	15,29		
Solo Misto - Análise Probabilística de Bishop Simplificado							
B	2,8235	2,1537	1,3486	0,8658	0,3971		
Coordenada (Xc;Yc);	(0,65; 22,25);	(0,5; 17,6);	(-3,0; 18,1);	(-2,5; 15,1);	(-3,5; 15,1);		
Raio [m]	22,25	17,29	18,29	15,29	15,29		

A Figura 4.22 apresenta o talude com as superfícies de ruptura apenas para as análises em que o índice de confiabilidade apresentou valores positivos. Ou seja, situações que, matematicamente, o talude analisado não estivesse rompido, tendo como base a equação probabilística de estado limite, como descrito na Equação (3.16).

Considerando os mesmos parâmetros de segurança aceitáveis conforme visto na análise de superfície crítica, é possível determinar as inclinações seguras para os taludes de solos arenoso, argiloso e misto. Essa determinação é observada conforme Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25.

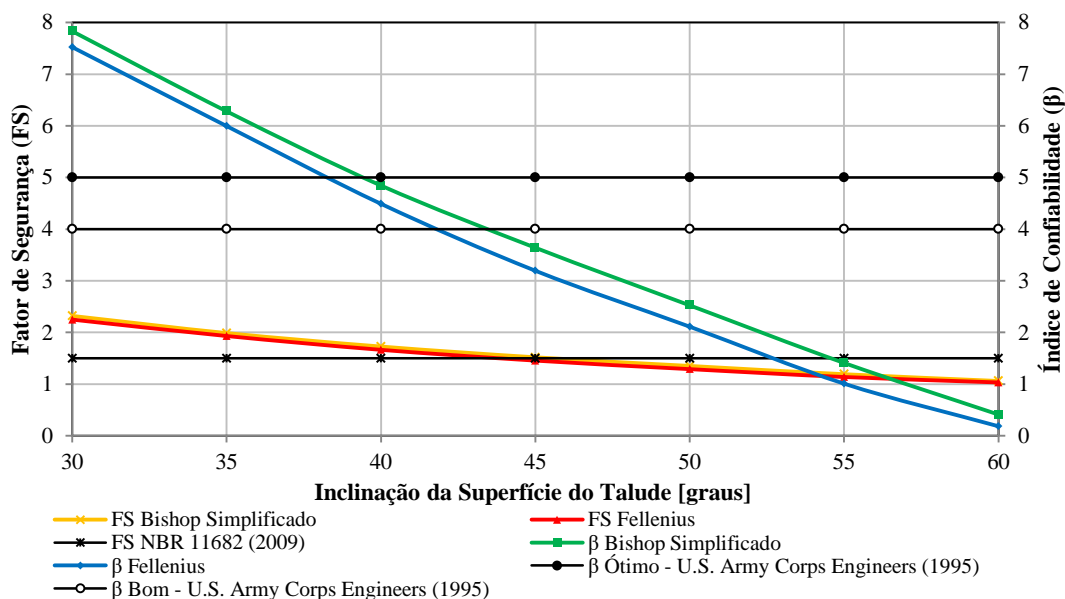


Figura 4.23 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo arenoso.

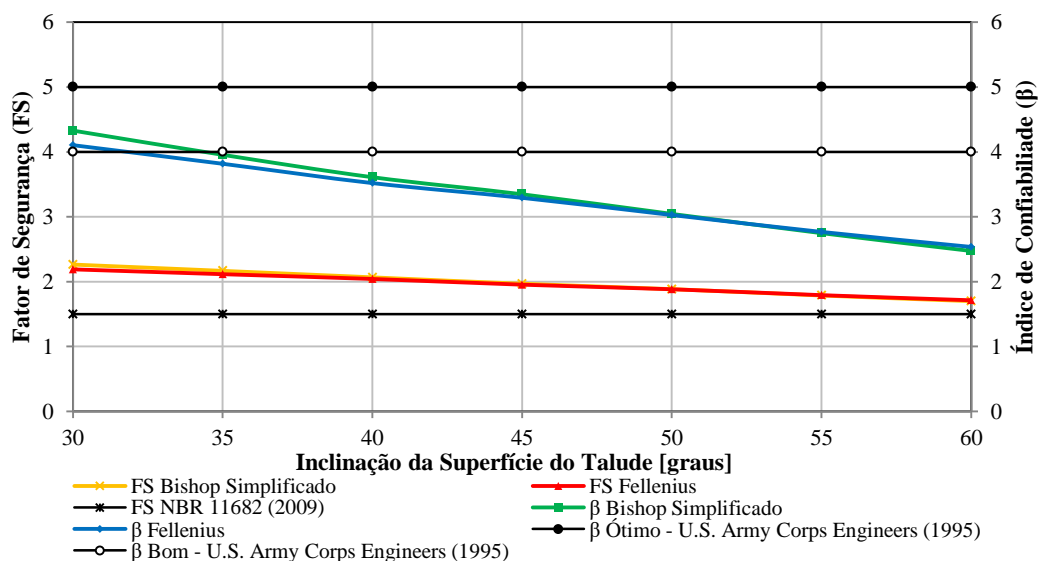


Figura 4.24 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo argiloso.

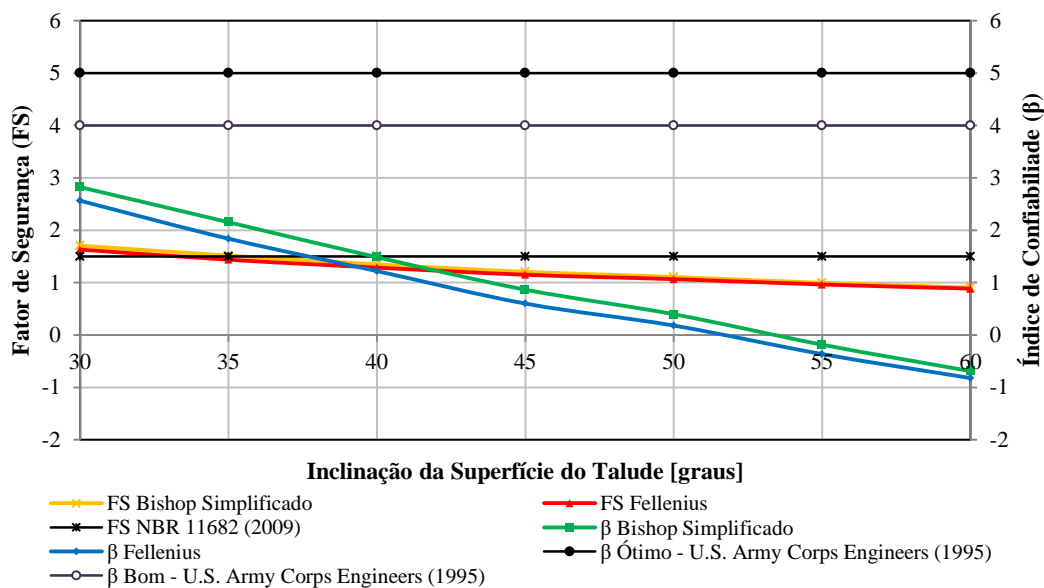


Figura 4.25 – Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança em relação a inclinação da superfície do talude: Solo misto.

Na análise realizada para o talude de solo arenoso é possível observar que a partir da inclinação da superfície superior a região entre 40° e 45° o índice de confiabilidade passa não ser mais aceitável. Isto, se baseando na classificação de índice de confiabilidade proposto por U.S. Army Corps of Engineers (1995).

O talude idealizado com solo argiloso tende a apresentar superfícies críticas com inclinações mais abatidas. Esse caso apresentou índices de confiabilidade aceitáveis com inclinações de superfícies entre 30° a 35°. Observa-se ainda nesta análise que mesmo o fator de segurança analisado seja aceitável para todas as inclinações avaliadas, somente aproximadamente 16,5% da inclinação investigada apresenta índices de confiabilidade aceitáveis.

A análise de inclinação para o talude de solo misto não apresentou índices de confiabilidade aceitáveis. Com a inclinação de superfícies superiores a 50°, a análise constatou ainda a ruptura de taludes com base nestas características de solo. Porém, para uma análise mais completa de superfícies críticas foi realizada uma comparação entre os métodos determinísticos e probabilísticos em função da variação da inclinação, conforme Figura 4.25.

Sendo assim, conforme observado na análise dos taludes independentemente do tipo de solo, em algumas inclinações em que o fator de segurança é aceitável, o índice de confiabilidade não se apresenta aceitável. Isto ocorre devido à consideração das incertezas inerentes ao solo, ao modelo matemático e às incertezas do processo de obtenção de dados.

4.4 Análise da Influência da Posição do Nível d'Água no Talude

Nesta análise, verificou-se a questão da segurança do talude em função da posição do nível d'água (N.A.), sem a ocorrência de fluxo. O talude idealizado foi composto por um solo característicos do campus experimental da UNESP – Bauru.

O talude, juntamente com as características físicas dos solos natural e saturado assumidos, é observado na Figura 4.26.

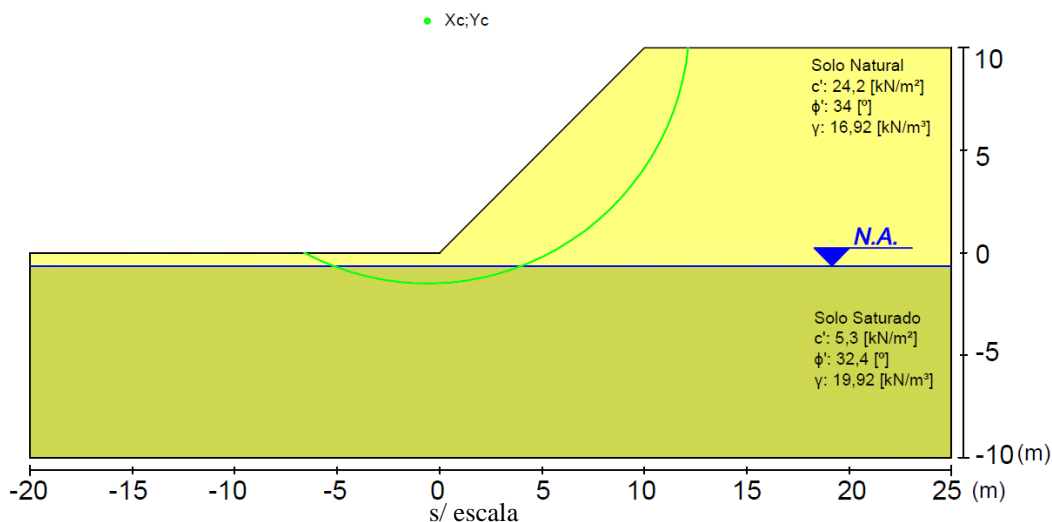


Figura 4.26 – Análise da influência da elevação do nível d'água.

Os resultados das análises determinísticas e probabilísticas com base nos métodos de Equilíbrio Limite de Fellenius e Bishop Simplificado são apresentados na Figura 4.27.

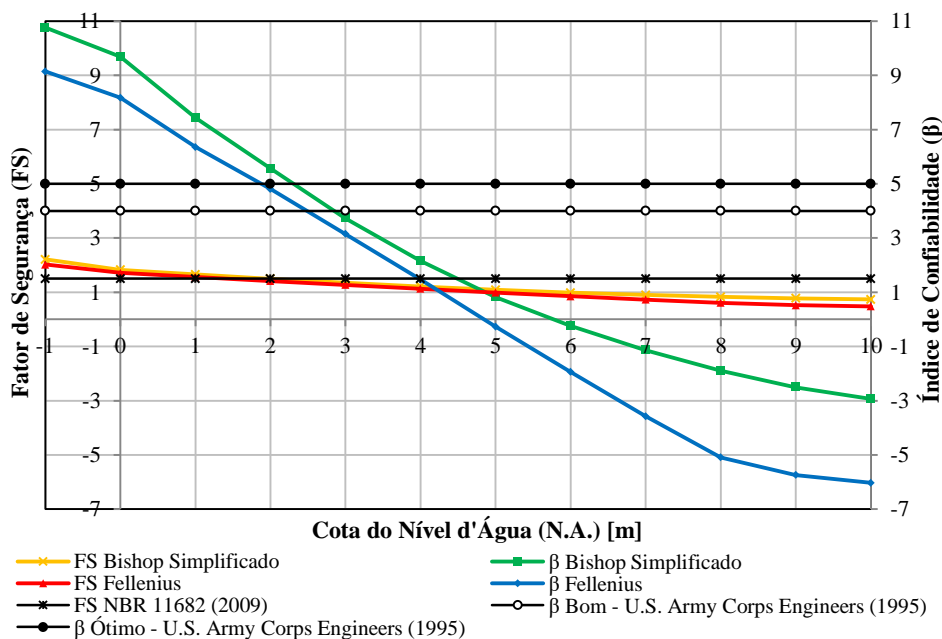


Figura 4.27 – Análise de elevação do nível d'água: Comparativo do índice de confiabilidade e fator de segurança.

A análise probabilística possibilitou ainda a avaliação das influências das variáveis aleatórias. A avaliação da influência considerou a elevação da posição do nível d'água para os métodos de Equilíbrio Limite de Fellenius e Bishop Simplificado, os resultados obtidos são observados conforme Figura 4.28 e Figura 4.29.

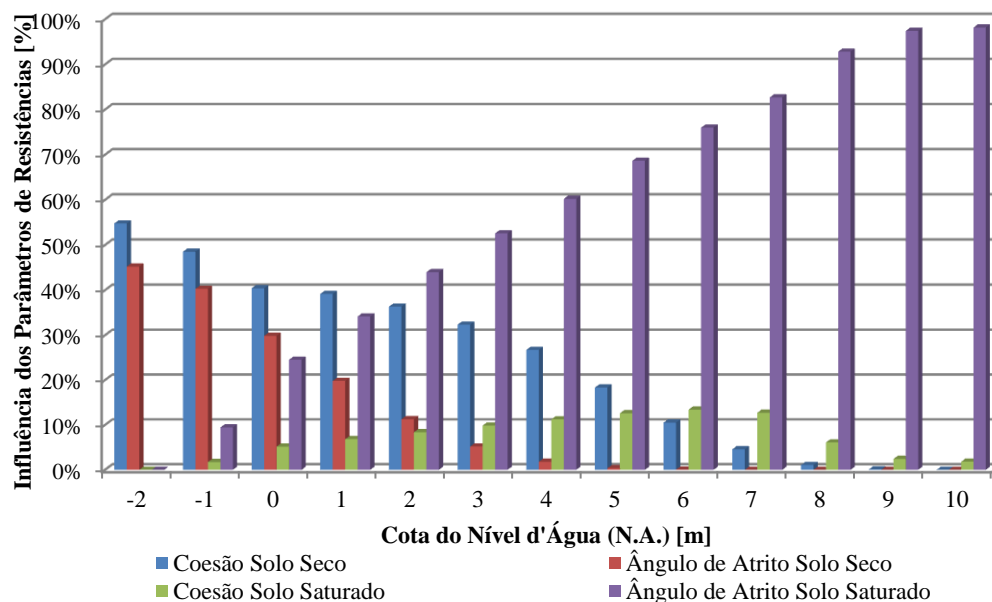


Figura 4.28 – Influência das variáveis aleatórias em função da elevação do nível d'água: Fellenius.

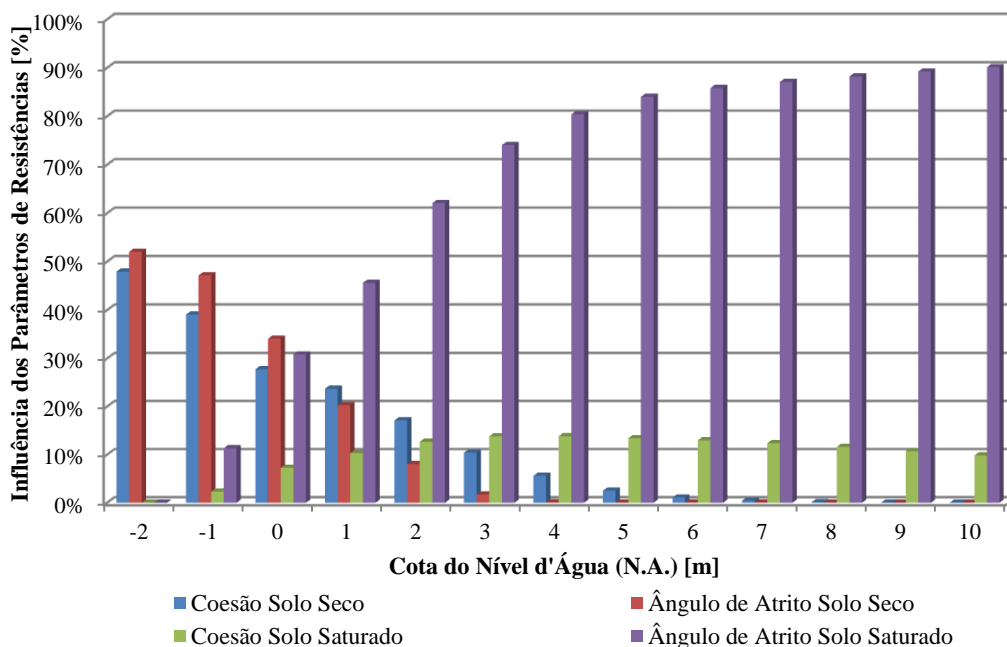


Figura 4.29 – Influência das variáveis aleatórias em função da elevação do nível d'água: Bishop Simplificado.

A avaliação da segurança do talude em função da pressão neutra sem ocorrência de fluxo apresentou quedas significativas dos valores de fator de segurança e índices de

confiabilidade conforme a posição do nível d'água se eleva. Sendo assim, o resultado demonstrou que a posição do nível d'água exerce grande influência sobre a estabilidade do talude.

Outro fato de elevada importância, é a verificação de posições do nível d'água que apresentaram índices de confiabilidade aceitáveis, enquanto os fatores de segurança mostraram-se abaixo do mínimo exigido pela NBR 11682 (2009). Este fato pode ser observado quando a cota do nível d'água se encontra aproximadamente entre 1,5m a 3,0m. Isto pode ser justificado em função das estatísticas assumidas para as variáveis aleatórias.

Interpretando a Figura 4.28 e a Figura 4.29 é possível analisar a mudança da influência dos parâmetros de resistência do solo natural para os parâmetros de resistência do solo saturado conforme a posição do nível d'água se eleva.

Para a análise com base no método de Fellenius, a variável aleatória que exerce maior influência na estabilidade quando a superfície crítica considera somente o solo natural (sem a presença do nível d'água) é a coesão do respectivo solo. Já para a análise com base no método de Bishop Simplificado nesta mesma condição a influência predominante é o ângulo de atrito. Apesar dos resultados serem próximos para os dois métodos, esta diferença se justifica em função da formulação matemática única de cada método.

Observa-se ainda através das Figura 4.28 e Figura 4.29, que conforme a cota do nível d'água se eleva, a influência dos parâmetros de resistência do solo natural diminui e a influência do solo saturado aumenta, como esperado. Porém, o parâmetro de resistência do solo saturado que mais influencia a resistência quanto à estabilidade do talude é o ângulo de atrito. Esta maior influência pode ser associada à pequena variação de valor que o ângulo de atrito (de 34° para $32,4^\circ$) sofre em relação à variação de valor da coesão (de 24,2 kPa a 5,3 kPa), quando o solo natural se torna saturado. Esta perda de coesão relacionada à saturação do solo é referenciada na literatura (PINTO, 2006).

5 CONCLUSÕES

Por meio das análises realizadas e nos resultados obtidos em relação ao comparativo dos métodos determinísticos e probabilísticos aplicados na análise de estabilidade de taludes infere-se que:

- As superfícies críticas obtidas pelos métodos determinísticos podem não coincidir com as superfícies que apresentam a maior probabilidade de falha. Portanto, análises baseadas apenas em modelos determinísticos podem apresentar valores de fatores de segurança admissíveis com probabilidades de falha não aceitáveis. Estas divergências são atribuídas às incertezas inerentes ao sistema;
- Através da análise do coeficiente de variação, observa-se que quanto maior for o nível de incerteza, maior será a probabilidade de falha. Com isso verifica-se a associação das incertezas do sistema com a probabilidade de falha. Sendo assim, em casos como este, é recomendado que as estatísticas que compõe as variáveis aleatórias sejam obtidas através de sucessivos ensaios que descrevam os parâmetros de resistência do maciço objeto de estudo/projeto;
- Os resultados da análise de influência da posição do nível d'água evidenciaram a minoração do valor da coesão em função da saturação do solo. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 4.27, que conforme a posição do nível d'água da cota -1,0 m eleva-se para a cota de +3,0 m, o valor do índice de confiabilidade diminui cerca de 65%. Sendo assim, essa minoração pode representar a ruptura do talude, visto isso, verifica-se a necessidade de conhecimento das condições climáticas do local do talude, bem como se deve sempre garantir o correto funcionamento dos drenos.
- Com base nas análises realizadas e nos resultados obtidos é possível inferir que a adoção da análise probabilística em projeto de taludes permite uma forma mais consistente de avaliar a segurança dos taludes, uma vez que a análise probabilística permite considerar as incertezas envolvidas no sistema. Outra vantagem apresentada pela análise probabilística via FORM, que pode ser utilizada como critério de tomada de decisão em projeto, é a avaliação da influência das variáveis aleatórias quanto à estabilidade do

talude, o que define a importância relativa de cada parâmetro de resistência do solo na segurança do talude.

De forma geral, é possível concluir que as investigações e análises geotécnicas aplicadas à estabilidade de taludes não podem ser generalizadas, pois as mesmas investigações aplicadas a três solos diferentes adotados neste estudo forneceram resultados distintos. A partir das considerações e resultados desta pesquisa, verifica-se a necessidade de avaliar as incertezas e os riscos inerentes aos projetos de taludes de uma forma consistente. Sendo assim, a aplicação de análises estatísticas via Teoria da Confiabilidade mostrou-se uma ferramenta de grande valia e que pode ser utilizada no auxílio do processo de tomada de decisões na implantação e execução nos projetos geotécnicos de engenharia.

Vale ainda ressaltar a necessidade de mais estudos acerca da quantificação das incertezas dos parâmetros de resistência dos solos através de métodos mais abrangentes, como a Teoria das Evidências (Helton et al. 2007) ou outros, para melhorar a avaliação da segurança dos taludes e auxiliar ainda mais o processo de tomada de decisões em obras desse tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, L. W. et al. **Slope stability and stabilization methods**. 2^a. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- ANG, H.-S. A.; TANG, H. W. **Probability concepts in engineering planning and design**. Illinois: John Wiley and Sons, v. 1 e 2, 1975.
- AOKI, N. **Dogma do fator de segurança**. Escola Engenharia São Carlos, São Carlos, 2008.
- AOKI, N. Probabilidade de falha e carga admissível de fundação por estacas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 19, p. 48-64, 2002.
- US ARMY CORPS ENGINEERS. **Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering**. [S.l.], p. 14. 1995. (ETL 1110-2-547).
- ASSIS, H. B. **Análise de estabilidade de taludes: uma abordagem probabilística via Teoria de Confiabilidade**. PIBIC - Reitoria UNESP. Bauru. 2017.
- ASSIS, H. B.; GIACON JUNIOR, A. J.; NOGUEIRA, C. G. Implementação em Planilha Eletrônica de Métodos de Equilíbrio Limite para Análise de Estabilidade de Taludes. **GEOCENTRO 2017**, Goiânia, p. 431-436, 2017.
- AZEVEDO, G. F. et al. Landslide Susceptibility Mapping Using GIS and Probabilistic Methods. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 22, p. 33-49, 2017.
- BAECHER, G. **Statistical Analysis of Geotechnical Data**. US Army Corpy of Engineers. Vicksburg, p. 145. 1987. (AD-A 186 797).
- BECK, A. T. **Curso de confiabilidade estrutural**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 187. 2006.
- BECK, A. T. **Curso de Confiabilidade Estrutural**. Notas de Aula. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014.

BECK, A. T.; DORIA, A. S. Reliability analysis of I-section steel columns designed according to new Brazilian building codes. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 152-159, June 2008. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782008000200008&lng=en&nrm=iso>. access on 05 Feb. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782008000200008>.

BRASIL, M. D. T. E. P. S. **Rompimento da Barragem de Rejeitos Fundão em Mariana - MG**. Seção de Segurança e Saúde no Trabalho - SEGUR. Belo Horizonte, p. 138. 2016.

CHOWDHURY, R. N.; XU, D. W. Slope system reliability with general slip surfaces. **Soils and foundations**, v. 34, n. 3, p. 99-105, 1994.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução de Tradução All Tasks: revisão técnico Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DER KIUREGHIAN, A.; DAKESSIAN, T. Multiple design points in first and second-order reliability. **Structural Safety**, v. 20, n. 1, p. 37-49, 1998.

EL-RAMLY, H. M. F. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice**. University of Alberta. Edmonton, p. 391. 2001.

ESPÓSITO, T.; ASSIS, A.; GIOVANNINI, M. Influence of the Variability of Geotechnical Parameters on the Liquefaction Potential of Tailing Dams. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 16, n. 4, p. 304-313, 2002.

FENTON, G. A.; GRIFFITHS, D. V. **Risk Assessment in Geotechnical Engineering**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 978-0-470-17820-1.

FERNANDES, J. B. **Resistência e deformabilidade de um solo não saturado a partir de ensaios triaxiais**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Bauru, p. 130. 2016a.

FERNANDES, M. A. **Estudo dos mecanismos de instabilização em talude de solo arenoso não saturado localizado na região centro-oeste paulista**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 283. 2016b.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. Universidade do Porto. Porto, p. 122. 2013.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. Pontífica Universidade Católica. Rio de Janeiro, p. 177. 2008.

FREITAS, M. S. da R. ; CASTANHEIRA, A. M. ; FREITAS, A. M. S. Confiabilidade de vigas metálicas dimensionadas pela norma brasileira NBR 8800. REM: **Revista Escola de Minas**, v. 60, n.2, p.261-269, abr-jun. 2007. Disponível em: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=56416460008>. Acesso em: 25/07/2012.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 37-40 p.

HASOFER, A. M.; LIND, N. C. Exact and invariant second-moment code format. **Journal of the Engineering Mechanics division**, v. 100, n. 1, p. 111-121, 1974.

HASSAN, A. M.; WOLFF, T. F. Search algorithm for minimum reliability index of earth slopes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 4, p. 301-308, 1999.

HELTON, J. C.; JOHNSON, J. D.; OBERKAMPF, W. L.; STORLIE, C. B. A sample-based computational strategy for the representation of epistemic uncertainty in model predictions with evidence theory. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 196, p. 3980-3998, 2007.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. Tradução de Arlete Simille Marques. 7ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 338-340 p.

HICKS, M. A.; NUTTALL, J. D.; CHEN, J. Influence of heterogeneity on 3D slope reliability and failure consequence. **Computers and Geotechnics**, v. 61, p. 198-208, 2014.

JIANG, S.-H.; HUANG, J.-S. Efficient slope reliability analysis at low-probability levels in spatially variable soils. **Computers and Geotechnics**, v. 75, p. 18-27, 2016.

LACASSE, S.; NADIM, F. Uncertainties in characterising soil properties. **Publikasjon - Norges Geotekniske Institutt**, Oslo, v. 201, p. 49-75, 1997. ISSN 0078-1193.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: Jhon Wiley & Sons, 1969.

LI, D. Q. et al. Efficient reliability updating of slope stability by reweighting failure samples generated by Monte Carlo simulation. **Computers and Geotechnics**, v. 69, p. 588-600, 2015a.

LI, D. Q. et al. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties. **Engineering Geology**, v. 187, p. 60-72, 2015b.

LI, D. Q. et al. Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, p. 5216-5229, 2016a.

LI, D. Q. et al. Response surface methods for slope reliability analysis: review and comparison. **Engineering Geology**, v. 203, p. 3-14, 2016b.

LI, Y. J.; HICKS, M. A.; NUTTALL, J. D. Comparative analyses of slope reliability in 3D. **Engineering Geology**, v. 196, p. 12-23, 2015c.

LUMB, P. The variability of natural soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 3, n. 2, p. 74-97, 1966. ISSN 10.1139/t66-009.

LUO, Ning; BATHURST, Richard J.; JAVANKHOSHDEL, Sina. **Probabilistic stability analysis of simple reinforced slopes by finite element method**. *Computers and Geotechnics*, v. 77, p. 45-55, 2016.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 63-74 p.

MIRANDA, M. F. **Avaliação da Estabilidade de Contenções através de Métodos Probabilísticos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense "Darcy Ribeiro". Campos dos Goytacazes, p. 175. 2005.

MORGENSTERN, N. R. Managing risk in geotechnical engineering. **Proceeding of the 10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, México, 4, 1995. 102-126.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**, Londres, v. 15, p. 78-93, 1965.

NBR 11682. **Estabilidade de encostas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2009. 33p.

NBR 13028. **Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2017. 16 p.

NIEBLE, C. M.; GUIDICINI, G. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2^a. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

NOGUEIRA, C. G. **Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estruturas de concreto armado**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 345. 2010.

NOGUEIRA, C. G.; LEONEL, E. D.; CODA, H. B.. Reliability algorithms applied to reinforced concrete structures durability assessment. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 440-450, Aug. 2012. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000400003&lng=en&nrm=iso>. access on 28 Jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952012000400003>.

PHOON, K.-K.; KULHAWY, F. H. Characterization of geotechnical variability. **Canadian Geotechnical Journal**, v. v. 36, p. 612-624, 1999.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3^o. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 14-15 p.

SAGRILO, Luis; DE LIMA, E. Um procedimento simplificado para análise de confiabilidade estrutural de plataformas marítimas fixas. **Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería**, v. 13, n. 2, p. 149-164, 1997.

SILVA, A. F. P. **Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo método de Correia**. Universidade do Porto. Porto, p. 153. 2013.

SILVA, J. L.; AOKI, N.; FRANCO, Y. B. Use of the order statistics when predicting pile foundation failure probability. **Dyna**, v. 84, n. 200, p. 247-252, 2017.

SILVA, J. L.; EL DEBS, M. K.; BECK, A. T. Avaliação da confiabilidade de tubos de concreto armado no estado limite de fissuração. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 1, n. 4, p. 314-330, Dec. 2008. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952008000400001&lng=en&nrm=iso>. access on 05 Feb. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952008000400001>.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. Universidade do Porto. Porto, p. 149. 2012.

TANG, X. S. et al. Copula-based approaches for evaluating slope reliability under incomplete probability information. **Structural Safety**, v. 52, p. 90-99, 2015.

VANMARCKE, E. H. Reliability of earth slopes. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v. 103, n. 11, p. 1247-1265, 1977.

ZENG, P.; JIMENEZ, R.; LI, T. An efficient quasi-Newton approximation-based SORM to estimate the reliability of geotechnical problems. **Computers and Geotechnics**, v. 76, p. 33-42, 2016.

ZHANG, J. et al. Extension of Hassan and Wolff method for system reliability analysis of soil slopes. **Engineering Geology**, v. 160, p. 81-88, 2013.

ZHANG, J.; HUANG, H. W. **Risk assessment of slope failure considering multiple slip surfaces**. **Computers and Geotechnics**, v. 74, p. 188-195, 2016.

ANEXO A – MÉTODO DE JANBU SIMPLIFICADO E GENERALIZADO

Devido à constituição do talude, que pode ser composto de estratos com pouca resistência, de forma descontínua e de reduzida espessura, a superfície de ruptura pode apresentar-se em distintas formas. Sendo assim, o método apresentando por Janbu analisa a estabilidade de um maciço de solo com a possibilidade de ilimitadas formas de superfície de ruptura (FERREIRA, 2013).

MÉTODO DE JANBU SIMPLIFICADO

O método de Janbu simplificado considera a subdivisão da massa de solo em n fatias infinitesimal (SILVA, 2013), a simplificação deste método consiste da desconsideração das forças interlamelares. A determinação do fator de segurança pelo método de Janbu Simplificado segue o mesmo procedimento do utilizado pelos métodos iterativos. Sendo a equação do fator de segurança descrita conforme a Equação (A.17):

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(c' + (p_i - u_i) \times \tan \varphi')}{n_{\alpha_i}}}{\sum_{i=1}^n dW_i \times \tan \alpha_i} \quad (A.17)$$

A incógnita n_{α_i} visto Equação (A.17) é representada na Equação (A.18).

$$n_{\alpha_i} = \cos^2 \alpha_i \times \left(1 + \frac{\tan \varphi'}{FS} \times \tan \alpha_i \right) \quad (A.18)$$

Em que (u_i) é o valor de pressão neutra média na base da lamela e (p_i) o peso médio da lamela derivada em função de seu ponto médio, conforme na Equação (A.19).

$$p_i = \frac{dW_i}{dx} = \frac{\gamma \times h_{m_i} \times dx}{dx} \quad (A.19)$$

Onde: (dW_i) é o peso da lamela, (h_{m_i}) a altura média da lamela e (γ) o peso específico do solo. Para cálculo do fator de segurança através do método de Janbu Simplificado Gerscovish (2012) descreve os procedimentos a serem seguidos:

- Adoção de uma superfície crítica de ruptura;
- Subdivisão da superfície crítica de ruptura em n lamelas, em que a largura da lamela (Δx) deve considerar as mudanças das propriedades do solo e distribuições dos valores de pressão neutra (u_i) que atuam na lamela;
- Determinação dos parâmetros geométricos da fatia;

- Determinação dos parâmetros do peso da lamela;
- Adoção de um valor de entrada para o fator de segurança;
- Cálculo da somatória dos esforços resistentes dividido pela somatória dos esforços atuantes, conseqüentemente cálculo do fator de segurança;
- Iteração até que o valor do fator de segurança calculado apresente erro relativo inferior ao erro máximo admissível previamente adotado quando comparado com o fator de segurança calculado.

O método apresenta bons resultados quando é aplicado em taludes homogêneos e que não tenham superfícies de ruptura em formato de cunha (GERSCOVICH, 2012).

MÉTODO DE JANBU GENERALIZADO

A generalização do método de Janbu assume que as forças de interação interlamelares podem ser anexadas ao cálculo do fator de segurança por meio de um fator de correção (f_o) (GERSCOVICH, 2012). Em que o fator de correção pode ser definido graficamente conforme Figura A.1.

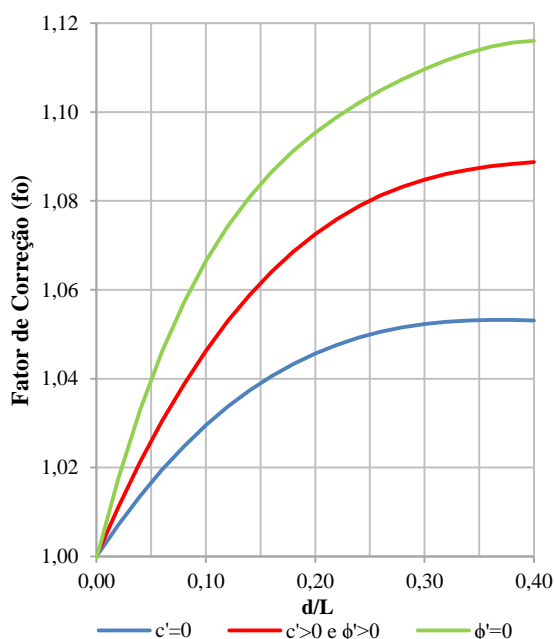


Figura A.1 – Método de Janbu Simplificado: Fator de correção.

Fonte: Adaptado de GERSCOVICH, 2012, pág. 137.

Onde o fator de correção é uma função entre a relação profundidade (d) dividida pelo comprimento da superfície de ruptura (L) e os parâmetros de resistências do solo. Os

parâmetros de resistência do solo são adotados de acordo com a classificação do solo, como elencado a seguir:

- Solo puramente arenoso ($c'=0$);
- Solo puramente argiloso ($\varphi'=0$);
- Solo misto ($c'>0$ e $\varphi'>0$).

O fator de correção pode ser definido por equacionamento, de acordo com o tipo de solo e sua respectiva curva, como descrito nas Equações (A.20), (A.21) e (A.22).

Para solos arenosos ($c'=0$):

$$f_o = 0,6269 \times \left(\frac{d}{L}\right)^3 - 0,8542 \times \left(\frac{d}{L}\right)^2 + 0,3741 \times \left(\frac{d}{L}\right) + 1 \quad (\text{A.20})$$

Para solos mistos ($c'>0$ e $\varphi'>0$):

$$f_o = 0,9609 \times \left(\frac{d}{L}\right)^3 - 1,28 \times \left(\frac{d}{L}\right)^2 + 0,5798 \times \left(\frac{d}{L}\right) + 1,0001 \quad (\text{A.21})$$

Para solos argilosos ($\varphi'=0$):

$$f_o = -6,9931 \times \left(\frac{d}{L}\right)^4 + 8,1112 \times \left(\frac{d}{L}\right)^3 - 3,8481 \times \left(\frac{d}{L}\right)^2 + 0,9803 \times \left(\frac{d}{L}\right) + 0,9995 \quad (\text{A.22})$$

A profundidade e o comprimento da superfície de ruptura adotados para cálculo do fator de correção podem ser observados na Figura A.2:

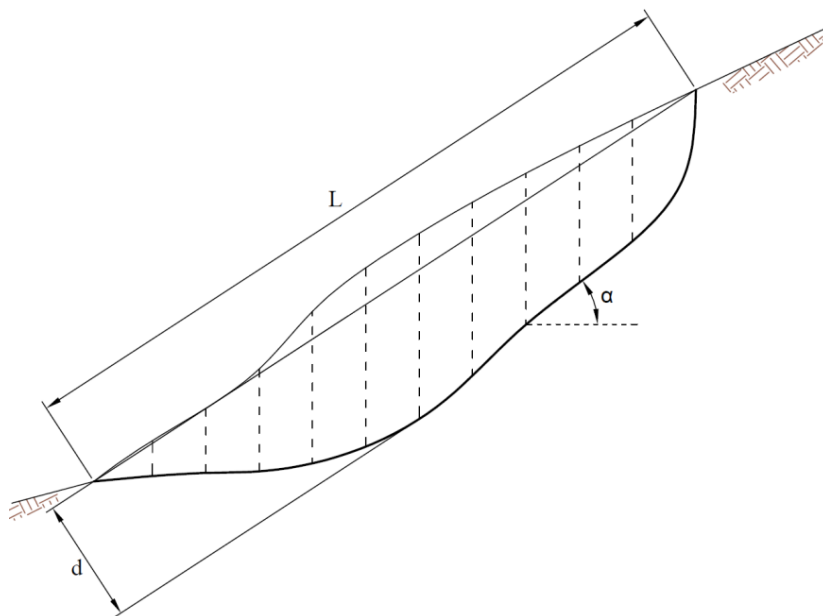


Figura A.2 – Método de Janbu Simplificado: Profundidade e comprimento da superfície de ruptura.

Sendo considerada para o cálculo do fator de correção a maior profundidade (d) encontrada. Determinado o fator de correção a equação do fator de segurança descrita conforme a Equação (A.23).

$$FS = f_o \times \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(c' + (p_i - u_i) \times \tan \varphi')}{n_{\alpha_i}}}{\sum_{i=1}^n dW_i \times \tan \alpha_i} \quad (A.23)$$

A incógnita n_{α_i} visto Equação (A.23) é representada na Equação (A.18).

IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DO FATOR DE CORREÇÃO EM PLANILHA ELETRÔNICA

Com intuito de descrever a implementação do fator de correção proposto pelo método de Janbu Simplificado em uma planilha eletrônica, a dedução matemática é realizada em análises em que a superfície de ruptura apresenta-se de forma circular no plano cartesiano.

A implementação fator de correção leva em consideração os parâmetros de profundidade e o comprimento da superfície de ruptura, conforme Figura A.3.

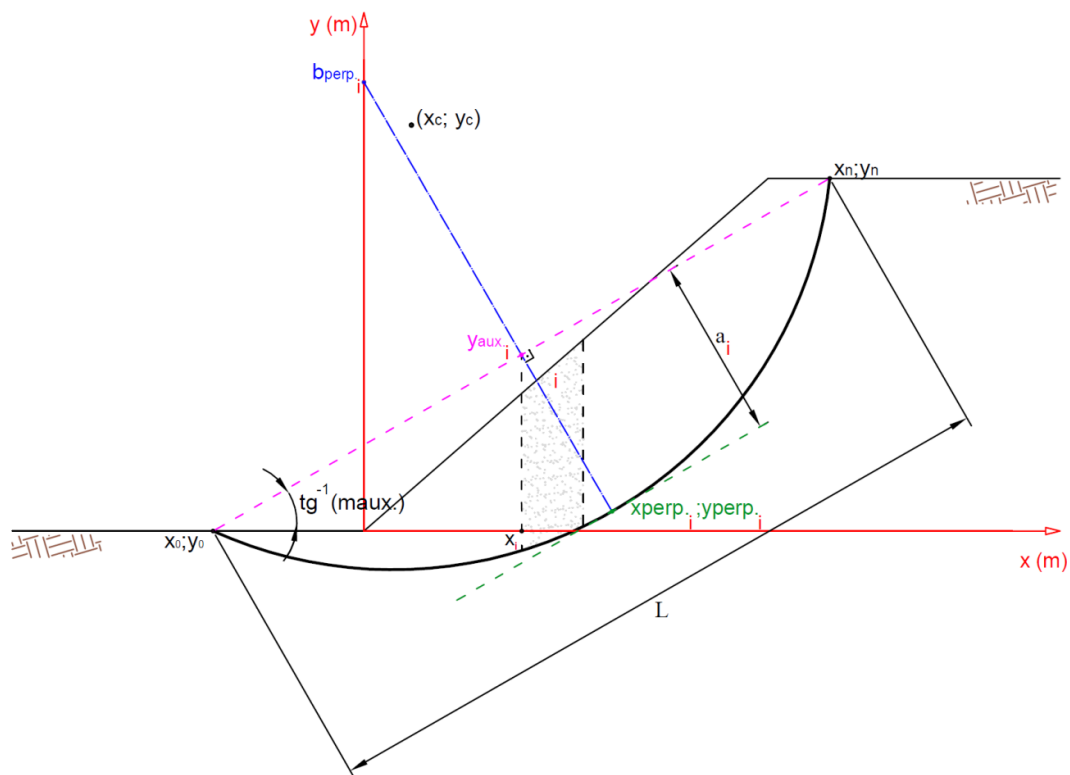


Figura A.3 – Método de Janbu Generalizado: Implementação do fator de correção.

Onde: (x_c) e (y_c) são as coordenadas do centro da superfície de ruptura circular e (a_i) é a profundidade relativa ao ponto inicial da respectiva lamela. Sendo esta análise aplicada ao número total de lamelas adotado na discretização. O valor da profundidade da superfície de ruptura deve ser o maior valor de profundidade (a) encontrado.

A determinação do comprimento da reta auxiliar (L) é descrito pela Equação (A.24).

$$L = \sqrt{(y_n - y_0)^2 + (x_n - x_0)^2} \quad (\text{A.24})$$

Para encontrar o valor da profundidade da superfície de ruptura (d), inicialmente é necessário determinar a reta $y_{aux.i}$, esta definida pelos pontos onde a superfície de ruptura intercepta a superfície do talude, representada pela Equação (A.25).

$$y_{aux.i} = m_{aux.} \times x_i + (m_{aux.} \times (-x_o) + y_0) \quad (\text{A.25})$$

Onde: $m_{aux.}$ é o coeficiente angular da reta $y_{aux.i}$, definido pela Equação (A.26).

$$m_{aux.} = \frac{(y_n - y_0)}{(x_n - x_0)} \quad (\text{A.26})$$

Determina-se o coeficiente linear da reta perpendicular $b_{perp.i}$ a reta auxiliar $y_{aux.i}$, o qual intercepta $(x_i, y_{aux.i}(x_i))$, sendo (x_i) a coordenada inicial na abcissa de cada lamela. Fornecido pela Equação (A.27).

$$b_{perp.i} = \frac{x_i}{m_{aux.}} + y_{aux.i} \quad (\text{A.27})$$

Encontra-se a coordenada na abcissa $x_{perp.i}$ paralela à reta auxiliar $y_{aux.i}$ e perpendicular ao coeficiente linear $b_{perp.i}$, a qual intercepta a superfície de ruptura. Definida pela Equação (A.28)

$$x_{perp.i} = \frac{m_{aux.} \times (\sqrt{A + B - C + D})}{m_{aux.} + 1} \quad (\text{A.28})$$

Onde: (r) é o raio da superfície de ruptura circular e as incógnitas (A), (B), (C) e (D) são definidos respectivamente pelas Equações (A.29), (A.30), (A.31) e (A.32).

$$A = (m_{aux.}^2 + 1) \times r^2 - b_{perp.i}^2 \times m_{aux.}^2 \quad (\text{A.29})$$

$$B = 2 \times b_{perp.i} \times m_{aux.} \times (m_{aux.} \times y_c + x_c) - m_{aux.}^2 \times y_c^2 \quad (\text{A.30})$$

$$C = 2 \times m_{aux.} \times x_c \times y_c - x_c^2 \quad (\text{A.31})$$

$$D = b_{perp.i} + m_{aux.} \times x_c \times y_c \quad (\text{A.32})$$

Encontra-se a ordenada do ponto $x_{perp.i}$. Sendo este ponto na ordenada $y_{perp.i}$ obtido pela Equação (A.33).

$$y_{perp.i} = -\left(\sqrt{r^2 - x_{perp.i}^2 + 2 \times x_c \times x_{perp.i} - x_c^2 - y_c}\right) \quad (\text{A.33})$$

A profundidade (a) é fornecida conforme Equação (A.34).

$$a_i = \sqrt{(y_{perp.i} - y_{aux.i})^2 + (x_i - x_{perp.i})^2} \quad (A.34)$$

A determinação da maior profundidade é realizada através de função lógica, a qual avalia todas as profundidades encontradas e retorna o maior valor.

Determinado a profundidade e o comprimento da superfície de ruptura, o valor do fator de correção pode ser determinado graficamente, através da Figura A.1 ou por meio das Equações (A.20), (A.21) e (A.22). Conforme referido, a adoção da equação ou curva (gráfico) que compõe a determinação do fator de correção deve respeitar os parâmetros de resistência do solo analisado.

O equacionamento dos parâmetros geométricos do talude e da superfície crítica para implementação em um programa computacional pode ser observado no trabalho de Assis *et al.* (2017).