



**CAROLINE CRISTINA CARVALHO**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES NA CIDADE DE  
LAVRAS/MG PELOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E  
PROBABILÍSTICO**

**LAVRAS – MG  
2019**

**CAROLINE CRISTINA CARVALHO**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES NA CIDADE DE LAVRAS/MG  
PELOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof.<sup>a</sup>. Ma. Raquel Mariano Linhares  
Orientadora

**LAVRAS – MG  
2019**

**CAROLINE CRISTINA CARVALHO**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES NA CIDADE DE LAVRAS/MG  
PELOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 28 de Novembro de 2019.

Prof.<sup>a</sup> Ma. Raquel Mariano Linhares UFLA

Prof. Me. Eduardo Souza Cândido UFLA

Prof. Dr. Rodrigo Allan Pereira UFLA

Prof.<sup>a</sup> Ma. Raquel Mariano Linhares  
Orientadora

**LAVRAS – MG  
2019**

*Aos meus pais Márcia e José Cláudio.  
A minha avó Maria Aparecida.  
Aos meus padrinhos Graciane e Cláudio.  
Às minhas afilhadas Aline e Elisa.  
Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras, por mudar a história de toda minha família através de uma educação de excelência.

Ao GEOTEC por compartilhar comigo o amor pela geotecnia e por todas as boas experiências vividas.

A todos os professores que pela minha vida acadêmica passaram.

À professora Raquel, por aceitar ser orientadora deste trabalho de conclusão de curso e por toda orientação, paciência e disposição para ajudar e ensinar.

Aos meus pais Márcia e Cláudio pelo amor e apoio incondicional, em todas as minhas decisões nas diferentes etapas da minha vida. À minha madrinha Graciane por ser meu maior exemplo de vida e a seu esposo, Aurélio por toda ajuda prestada. Ao meu padrinho, Cláudio, por toda atenção durante essa jornada. À minha avó, Maria Aparecida por sempre ser fonte de amor e cuidado e às minhas afilhadas, Aline e Elisa, que foram responsáveis por me alegrar nos momentos de dificuldade.

Às amigas Marcela Caovila Carvalho Pinto, Paula Fernanda de Oliveira Aniceto, Flávia Roberta Vale Campos, Mirella Coutinho Fernandes, Elidiane Dias Paiva e Rafaella Zacaroni Silva, pela amizade e companheirismo em todas as etapas do curso. Estejam certas de que vocês fazem parte da alegria de cumprir essa etapa tão almejada. Aos amigos de longa data e àqueles que fiz nesse período, Antonio, Cristiano, Gabriela, Thamara, Isabella, Daniella, Nicole e Lia por proporcionarem os melhores momentos vividos em Lavras.

Aos demais familiares pelo carinho e incentivo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

Ao se ponderar sobre a ocupação de vertentes, a falta de conhecimento, planejamento e análise tem sido uma das maiores causas de acidentes envolvendo problemas de estabilidade de encostas. A alta variabilidade dos parâmetros do solo influencia diretamente nos resultados obtidos nas análises de estabilidade de talude. Dessa forma, progressivamente torna-se imprescindível a utilização de métodos que garantam a segurança das estruturas geotécnicas. É o caso dos métodos probabilísticos que buscam, através da probabilidade, incorporar as incertezas relacionadas, complementando as análises determinísticas já existentes. O método de simulação de Monte Carlo tem sido amplamente utilizado na análise probabilística da estabilidade de taludes e fornece uma maneira robusta e simples de avaliar a probabilidade de falha. O presente trabalho apresenta as avaliações determinística e probabilística de um talude representativo dos encontrados no município de Lavras/MG, no bairro Nilton Teixeira, classificado como região de alto risco pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Com base em revisão da literatura e análise dos dados, foi estudada a variabilidade de dois parâmetros de alto grau de influência na análise de estabilidade de taludes, coesão e ângulo de atrito. Como resultado, foram obtidas a distribuição estatística do fator de segurança (média e desvio padrão), o índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura do talude em questão, onde observou-se a influência da inclinação da face do talude e da variação do nível d'água no valor do fator de segurança obtido.

**Palavras-chave:** Método de equilíbrio limite. Método de simulação de Monte Carlo. Fator de Segurança. Probabilidade de ruptura.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Envoltória de Mohr-Coulomb.....	16
Figura 2- Equipamento para ensaio de cisalhamento direto.....	18
Figura 3- Equipamento para ensaio triaxial.....	19
Figura 4- a) Escoamento; b) Escorregamento; c) Queda de blocos e d) Tombamento.....	22
Figura 5-Divisão de um talude genérico em fatias.....	24
Figura 6- Método de Fellenius.....	25
Figura 7- Método de Bishop.....	25
Figura 8- Método de Janbu.....	26
Figura 9- Exemplo de histograma de distribuição de probabilidade do FS obtido pela aplicação do método de Monte Carlo.....	27
Figura 10- Localização e delimitação do município de Lavras no estado de Minas Gerais. ...	28
Figura 11- Mapa pedológico do município de Lavras-MG.....	29
Figura 12- Área de análise no bairro Nilton Teixeira.....	31
Figura 13- Sobreposição de mapas para determinação do tipo de solo do talude localizado no bairro Nilton Teixeira.....	32
Figura 14- Seção A e seção B, respectivamente, referentes ao talude localizado no bairro Nilton Teixeira.....	33
Figura 15- Perfil representativo da cidade de Lavras.....	34
Figura 16- a) Densidade de probabilidade e b) Função de amostragem para a variável ângulo de atrito.....	37
Figura 17- a) Densidade de probabilidade e b) Função de amostragem para a variável coesão.....	38
Figura 18- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.....	41
Figura 19- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B seca.....	42
Figura 20- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na presença de água.....	44
Figura 21- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na presença de água.....	45

Figura 22- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição saturada. ....	47
Figura 23- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição saturada. ....	48
Figura 24- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição seca. ....	50
Figura 25- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na condição seca pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	51
Figura 26- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição seca. ....	53
Figura 27- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na condição seca pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	54
Figura 27- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na presença de água. ....	56
Figura 29- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na presença de água pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	57
Figura 28- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na presença de água. ....	59
Figura 31- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na presença de água pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	60
Figura 29- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição saturada. ....	62
Figura 33- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na condição saturada pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	63
Figura 30- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição saturada. ....	65
Figura 35- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na condição saturada pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores típicos de ângulo de atrito para solos granulares. ....	17
Tabela 2- Valores típicos de ângulo de atrito para argilas pré-adensadas.....	17
Tabela 3- Características dos métodos de equilíbrio limite.....	23
Tabela 4-Síntese dos setores de risco alto e muito alto. ....	30
Tabela 5- Perfil característico do subsolo do município de Lavras.....	34
Tabela 6-Densidade do solo ( $D_s$ ), umidade na sucção de 0,01 MPa (U), quantidades de argila e areia e resultados do ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas coletadas na profundidade de 0 a 0,03 m, para a umidade a -0,01 MPa. ....	35
Tabela 7- Valores e padrões para Cov.....	36
Tabela 8- Variabilidade referente aos parâmetros coesão e ângulo de atrito. ....	37
Tabela 9- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na condição seca. ....	40
Tabela 10- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na presença de água a 1,8 metros. ....	43
Tabela 11- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na condição saturada. ....	46
Tabela 15- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na condição seca. ....	49
Tabela 16- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na condição seca. ....	52
Tabela 17- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na presença de água a 1,8 metros. ....	55
Tabela 18- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na presença de água a 1,8 metros. ....	58
Tabela 19- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na condição saturada.....	61
Tabela 20- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na condição saturada.....	64
Tabela 21- Compilado dos resultados de FS obtidos, sem arredondamento.....	67



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas. ....	13
Quadro 2- Nível de segurança desejado contra a danos materiais e ambientais. ....	14
Quadro 3- Fatores de segurança mínimos para estabilidade de taludes. ....	14
Quadro 4- Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978). ....	20
Quadro 5- Classificação dos movimentos de encosta segundo Guidicini e Nieble (1988). ....	21

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

FS	Fator de segurança
IP	Índice de Plasticidade
FOSM	Primeira Ordem e Segundo Momento (First Order Second Moment)
Cov	Coefficiente de variação

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Tensão normal
$\tau$	Tensão cisalhante
$\phi$	Ângulo de atrito
$c$	Coesão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
2.1	Resistência ao Cisalhamento dos solos .....	12
2.2	Envoltória de Mohr-Coulomb .....	15
2.3	Estabilidade de taludes .....	19
2.4	Métodos de análise de estabilidade para ruptura circular .....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	28
3.1	Caracterização da área de estudo .....	28
3.2	Área estudada e geometria adotada.....	29
3.3	Nível de água.....	33
3.4	Parâmetros geotécnicos e probabilísticos de resistência do solo .....	35
3.5	<i>Software</i> utilizado e análises realizada.....	39
4	RESULTADOS e Discussão.....	40
4.1	Análise determinística na condição seca.....	40
4.2	Análise determinística na presença de água.....	43
4.3	Análise Determinística na condição saturada .....	46
4.4	Análise probabilística na condição seca.....	49
4.5	Análise probabilística na presença de água.....	55
4.6	Análise probabilística na condição saturada .....	61
4.7	Resumo dos resultados e discussão.....	67
5	Conclusões E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	69
5.1	Sugestões para pesquisas futuras .....	69
6	REFERÊNCIAS.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

Observando o cenário das ocupações urbanas no Brasil, é possível perceber o aumento da taxa destas em encostas. Apesar dos movimentos coletivos de rocha e solo serem um processo natural, diversas famílias ao se estabelecerem nessas vertentes podem ocupar zonas críticas de estabilidade, seja devido à ausência de conhecimento sobre os mecanismos de estabilidade do terreno ou puramente por falta de alternativas mais seguras. Com a alta demanda habitacional e as possíveis alterações do terreno para tal fim, é notório que a ocupação do espaço urbano leva, conseqüentemente, à formação das áreas de risco e a movimentos de massa.

Regiões de clima tropical, apresentam frequentemente problemas de instabilidade de encostas, fato que pôde ser observado no município de Lavras/MG no ano de 2015 quando um deslizamento de terra atingiu três casas localizadas no bairro Vila Menicucci (G1 SUL DE MINAS, 2015). A onerosidade e aumento dos índices de ocorrência desses eventos têm mostrado a importância de se conhecer os fenômenos para tornar mínimos os danos correntes nos períodos chuvosos. Porém, a solução de tal problema depende, primeiramente, da compreensão sobre a estabilidade de taludes.

Segundo Linhares (2011), através do conhecimento dos parâmetros de resistência do solo, torna-se possível compreender, prever e prevenir movimentos de massa, evitando perdas de vidas humanas e bens materiais. Ainda, a importância do estudo dos fatores que influenciam nesta resistência é enfatizada.

De acordo com Aluko & Koolen (2000), a resistência à tração dos solos é derivada das ligações entre os agregados e ligações internas a estes agregados, caracterizando a resistência à tração como sendo a força necessária para romper estas ligações. Por sua vez, como o solo é um meio particulado, não resiste bem as forças de tração. Comumente, admite-se que o solo apresenta limitações quanto à resistência a tração ou que este valor de resistência é desprezível quando comparado com a resistência à compressão ou ao cisalhamento. No que se refere a análise de estabilidade de taludes, geralmente, são considerados exclusivamente os casos de sollicitação por cisalhamento.

O método de equilíbrio limite é o método de análise de estabilidade mais usado. De uma maneira simplificada, a partir dos parâmetros de resistência do solo e características do talude, é gerado um valor de Fator de Segurança (FS) que imprime o grau de estabilidade em que o talude se encontra, sendo que o mesmo deve ser majorado dependendo dos danos que a sua ruptura possa acarretar.

As abordagens usualmente utilizadas em cálculos de estabilidade negligenciam a existência da variabilidade das propriedades inerentes do solo. No entanto, as análises baseadas em conceitos probabilísticos, uma vez que levam em conta essa variabilidade, cada vez são concebidas como abordagens mais racionais (CHOK, 2008).

Para aperfeiçoar e promover a análise, softwares como o SLOPE/W permitem aferir o valor do FS a partir de diferentes métodos, podendo assim, realizar uma comparação entre os mesmos, para que o projetista possa adotar o valor que melhor representa a situação real.

Este trabalho teve como objetivo principal estudar a estabilidade de um talude em uma região de alto risco no município de Lavras/MG, cotejando os resultados obtidos através de métodos determinísticos e probabilístico.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resistência ao Cisalhamento dos solos

De acordo com Caputo (2015), a propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da sua resistência ao cisalhamento, ou seja, toda massa de solo se rompe quando a tensão resistente é excedida.

Um talude de solo se desestabiliza quando as tensões cisalhantes nele atuantes igualam-se as suas tensões cisalhantes resistentes. Essa condição pode ser alcançada por diversos fatores como: (i) intervenção do homem: eliminando ou suprimindo a cobertura vegetal, alterando a rede de drenagem natural do solo; mudando a geometria das encostas, ao retirar massas inferiores das vertentes; rebaixando rapidamente o lençol freático; aplicando sobrecarga, caso das ocupações supracitadas ou (ii) por processos naturais de intemperismos, como a oscilação térmica que provocam alterações volumétricas no maciço e favorecem a entrada de água da chuva através de fraturas (GUIDICINI & NIEBLE, 2013).

O movimento de massas de solo pode ser desencadeado, também, por sismos e atividades vulcânicas. Tais fenômenos raramente ocorrem no Brasil e, quando ocorrem, são de baixa magnitude e impacto, por isso, infreqüentemente são levados em conta nas análises de estabilidade.

Os solos são formados por porcentagens em peso distintas de várias faixas granulométricas (argilas, siltes, areias, pedregulhos), cada qual possuindo sua densidade e formato de partículas próprias que afetam as suas propriedades mecânicas. Tal característica confere ao solo grande heterogeneidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (MAIA & ASSIM, 2004).

A NBR 11682 (ABNT, 2009), que trata sobre a estabilidade de encostas, relaciona os esforços estabilizantes (resistentes) e os esforços desestabilizantes (solicitantes) por meio do Fator de Segurança (FS), conforme Fórmula (1): quanto maior FS, maior é a segurança do talude contra a ruptura, devendo sempre ser maior do que um.

$$FS = \frac{\text{esforços resistentes}}{\text{esforços atuantes}} \quad (1)$$

Ainda segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), o nível de segurança exigido para um talude varia de acordo com a possibilidade de perda de vidas humanas e os danos materiais e ambientais possíveis, como podem ser observados pelos Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1- Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.

Nível de segurança	Critérios
<b>Alto</b>	Áreas de intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residências ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
<b>Médio</b>	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
<b>Baixo</b>	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Quadro 2- Nível de segurança desejado contra a danos materiais e ambientais.

<b>Nível de segurança</b>	<b>Critérios</b>
<b>Alto</b>	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetam serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeitos e fábricas de produtos tóxicos.
<b>Médio</b>	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
<b>Baixo</b>	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Após a classificação do projeto é possível determinar os níveis de segurança mínimo no que se refere às análises de estabilidade interna e externa de taludes, conforme pode ser notado no Quadro 3.

Quadro 3- Fatores de segurança mínimos para estabilidade de taludes.

<b>Nível de segurança contra danos materiais e ambientais</b>	<b>Nível de segurança contra danos a vidas humanas</b>		
	Alto	Médio	Baixo
<b>Alto</b>	1,5	1,5	1,4
<b>Médio</b>	1,5	1,4	1,3
<b>Baixo</b>	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

No momento da ruptura e ao longo da superfície de ruptura atuam, simultaneamente, a tensão normal ( $\sigma$ ) e a tensão tangencial ( $\tau$ ). Segundo Guidicini e Nieble (2013), os parâmetros mais significativos dos materiais, na discussão de problemas de estabilidade, são o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e a coesão ( $c$ ) entre partículas.

Gerscovich (2016) definiu a coesão verdadeira como sendo a resistência do solo proporcionada através da relação físico-química exercida entre as partículas que compõem a massa do solo. É importante ressaltar a diferença entre os conceitos de “coesão verdadeira” e a “coesão aparente”. Segundo Caputo (2015), a primeira, deve-se às forças eletroquímicas de atração das partículas entre si; a segunda, é resultante da pressão capilar externa que a água contida na amostra exerce no solo.

Já o atrito pode ser definido como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano em relação a outro de forma paralela. O ângulo formado entre a força normal e a força resultante gerada é chamado de ângulo de atrito ( $\phi$ ), sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal sem que ocorra o deslizamento da massa de solo.

Através da equação de Coulomb, esses conceitos se relacionam ao representar a resistência ao cisalhamento do solo conforme é exibido na Fórmula (2).

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2)$$

Onde:

C = coesão;

$\phi$  = Ângulo de atrito interno;

$\sigma$  = Tensão normal no plano de ruptura;

$\tau$  = Resistência ao cisalhamento.

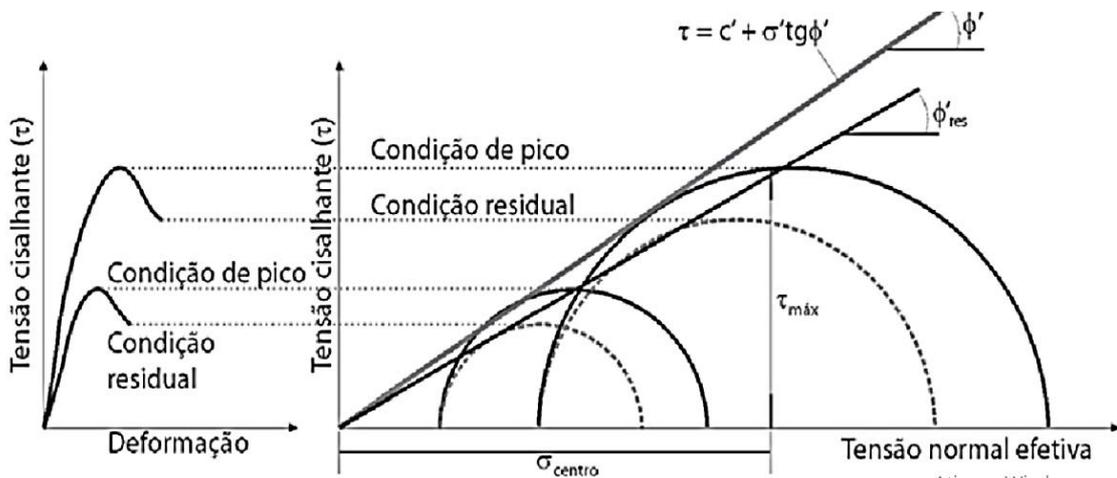
## 2.2 Envoltória de Mohr-Coulomb

Os critérios de ruptura são fórmulas que expressam o comportamento do solo até o momento da ruptura. Conforme Gerscovich (2016), qualquer ponto no interior da sua massa está sujeito a esforços em razão do peso próprio, além daqueles gerados por forças externas. Esses esforços podem ser representados por suas resultantes atuantes nas direções normal e tangencial, a partir das quais, definem-se os estados de tensão normal e cisalhante.

Segundo Pinto (2000) os critérios que melhor representam o comportamento dos solos são o de Coulomb e de Mohr, que são complementares e tomam por base o estado de tensões, afirmando que a ruptura ao cisalhamento do solo ocorre apenas quando ao diagrama circular de tensões atuantes no plano alcançam as envoltórias dos círculos de Mohr. O critério de

ruptura de Mohr-Coulomb lineariza as envoltórias de tensões, definido a envoltória como uma reta, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1- Envoltória de Mohr-Coulomb.



Fonte: Gerscovich (2016).

Assim sendo, estados de tensão abaixo da envoltória correspondem a situações de estabilidade, enquanto a região acima da envoltória corresponde a estados de tensão impossíveis de ocorrer, pois se localizam após a resistência do material. Portanto, o estado de tensões acaba definindo a resistência do solo.

Ao longo dos anos, percebeu-se que os solos apresentam comportamentos relacionados com a porcentagem de cada graduação presente em sua composição. Solos arenosos apresentam-se normalmente como não coesivos, de alta permeabilidade e elevado ângulo de atrito. Já solos com maior teor de argila são caracterizados como coesivos, de baixa permeabilidade e de baixo ângulo de atrito.

Pinto (2000) mostrou que as areias constituídas de partículas esféricas e arredondadas têm ângulos de atrito menores que areias compostas de grãos angulares. Isso se dá pelo entrosamento das partículas. Outro ponto que interfere no atrito entre as partículas é a compactidade, que nada mais é do que a quantificação do índice de vazios. A partir dessas observações, foi possível relacionar os ângulos de atrito interno em areias devido a sua compactidade, conforme pode ser notado na Tabela 1.

Tabela 1- Valores típicos de ângulo de atrito para solos granulares.

		<b>Compacidade</b>	
		Fofa	Compacta
<b>Areia bem graduada</b>	De grãos angulares	37°	a 47°
	De grãos arredondados	30°	a 40°
<b>Areia mal graduada</b>	De grãos angulares	35°	a 43°
	De grãos arredondados	28°	a 35°

Fonte: Pinto (2000).

Assim como ocorre com as areias, a resistência ao cisalhamento das argilas está diretamente relacionada com o atrito entre as partículas, e conseqüentemente, com as tensões efetivas. Logo o seu ângulo de atrito é tanto menor quanto mais argiloso for o solo (PINTO, 2000).

Caputo (2015) definiu Índice de Plasticidade (IP) como um determinante da zona em que o solo se encontra no estado plástico e, por ser máximo para as argilas e nulo para as areias, fornece um critério para se ponderar o caráter argiloso de um solo; assim, quanto maior o IP, tanto mais plástico será o solo. Na Tabela 2 pode ser observado a relação entre os conceitos de IP e ângulo de atrito para argilas.

Tabela 2- Valores típicos de ângulo de atrito para argilas pré-adensadas.

<b>Índice de plasticidade</b>	<b>Ângulo de atrito</b>
10	30° a 38°
20	26° a 34°
40	20° a 29°
60	18° a 25°

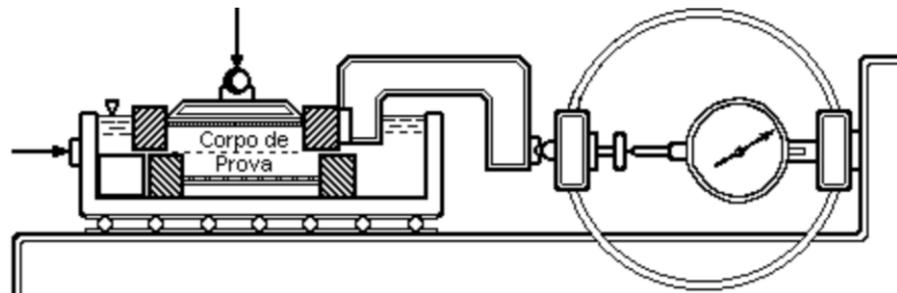
Fonte: Adaptado de Pinto (2000).

Em condição natural, é comum observar solos com composição mista, porém preponderando em partículas finas ou grossas. Esses solos são classificados como solos intermediários, e apresentam comportamento também intermediário.

Para tais casos, há diversas formas de quantificar esta resistência, seja por ensaios em campo ou ensaios em laboratório. Caputo (2015) afirma que os três ensaios normalmente utilizados são: o ensaio de cisalhamento direto, o ensaio de compressão triaxial e o ensaio de compressão simples.

O ensaio de cisalhamento direto, segundo Caputo (2015), consiste na aplicação de uma tensão normal para realizar a determinação da tensão de cisalhamento necessária para que ocorra a ruptura de uma amostra de solo localizada no interior de uma caixa composta de duas partes deslocáveis entre si. Repetindo-se o ensaio para várias amostras submetidas à diferentes tensões normais, obtém-se um conjunto de pares de valores da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) em função da tensão normal ( $\sigma$ ), que formam uma reta cuja inclinação é o ângulo de atrito do solo ( $\phi$ ). O esquema do equipamento para a realização do ensaio pode ser visualizado na Figura 2.

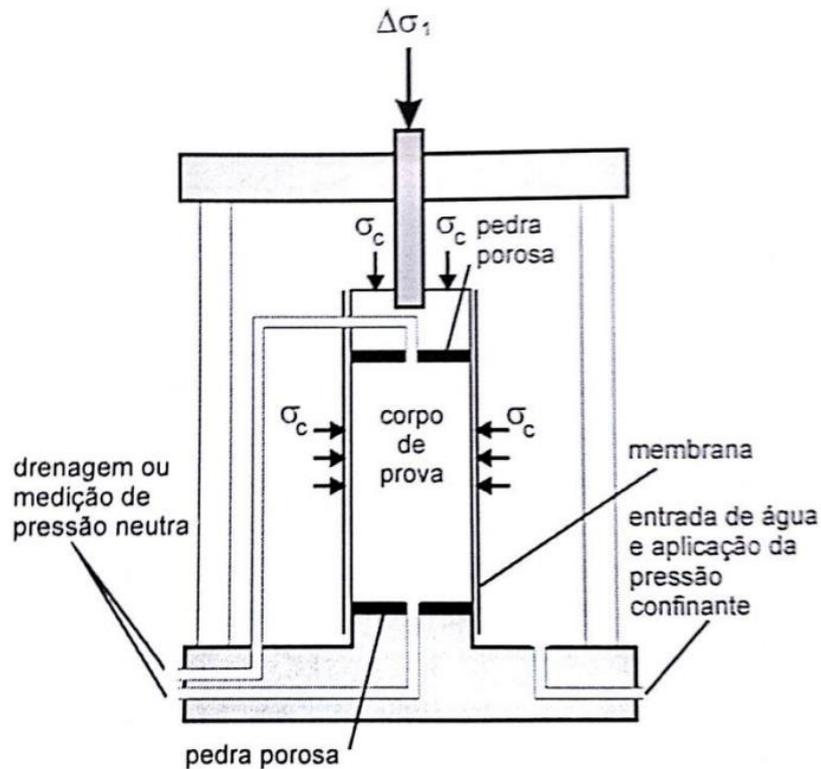
Figura 2- Equipamento para ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Rocha (2003).

Segundo Pinto (2000), o ensaio de compressão triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo que é colocado dentro de uma câmara de ensaio e envolto por uma membrana de borracha. A câmara é cheia de água, à qual se aplica uma pressão, que é chamada de pressão confinante. Esta pressão atua em todas as direções, inclusive na vertical e, a partir de então, o corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões. Em seguida, é aplicada uma tensão vertical desviadora responsável por romper a amostra. O esquema é mostrado na Figura 3.

Figura 3- Equipamento para ensaio triaxial.



Fonte: Pinto (2000).

Segundo Caputo (2015) o ensaio de compressão simples é um caso especial de compressão triaxial onde a tensão confinante é igual a pressão atmosférica. Diferentemente do ensaio exibido anteriormente, a amostra de solo é colocada entre dois pratos em uma prensa e então é aplicado progressivamente uma tensão desviadora na vertical. Neste caso, não é possível obter o ângulo de atrito do solo.

### 2.3 Estabilidade de taludes

Gerscovich (2016) definiu como movimento de massa todo deslocamento de um determinado volume de solo, fato geralmente associado com a desestabilização de taludes. Existem diversas propostas de sistema classificação, entretanto, as classificações de Varnes (1954,1978) e Guidicini e Nieble (1983) são as mais utilizadas e podem ser observadas no Quadro 4 e Quadro 5, respectivamente. Sendo a de Varnes (1978) a mais utilizada internacionalmente.

Quadro 4- Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978).

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rochas	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades	De blocos rochosos	De blocos de detritos	De blocos de terra
			De rocha	De detritos	De terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solo)	
Complexos			Combinações de dois ou mais dos principais tipos de movimentos.		

Fonte: Gerscovich (2016).

Quadro 5- Classificação dos movimentos de encosta segundo Guidicini e Nieble (1988).

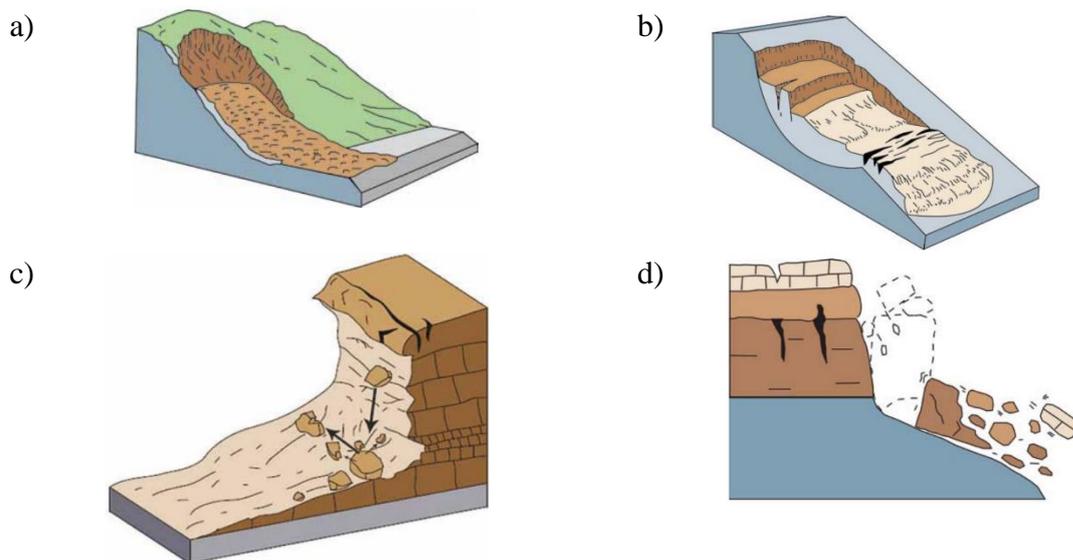
Processo	Subprocesso	Classes
Escoamento	Rastejo (escoamento plástico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rastejo de solo</li> <li>• Rastejo de detritos de tálus</li> <li>• Rastejo de rocha</li> <li>• Solifluxão</li> <li>• Rastejo de detritos de geleiras</li> <li>• Geleiras</li> </ul>
	Corrida (escoamento líquido)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corridas de terra</li> <li>• Corridas de areia e silte</li> <li>• Corrida de lama</li> <li>• Avalanche de detritos</li> </ul>
Escorregamentos	Escorregamentos rotacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escorregamento de taludes</li> <li>• Escorregamento de base</li> <li>• Rotura rotacional de solo de fundação</li> </ul>
	Escorregamentos translacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escorregamento translacional de rocha</li> <li>• Escorregamento translacional de solo</li> <li>• Escorregamento translacional de solo e rocha</li> <li>• Escorregamento translacional retrogressivo</li> <li>• Queda de rocha</li> <li>• Queda de detritos</li> </ul>
Subsidência	Subsidências	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por carreamento de grãos</li> <li>• Por dissolução de camadas inferiores e cavernas</li> <li>• Por deformação de estratos inferiores</li> <li>• Por retirada de suporte lateral</li> </ul>
	Recalques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por consolidação</li> <li>• Por compactação</li> </ul>
	Desabamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por rotura de camada</li> <li>• Por subescavação</li> <li>• Por retirada de suporte lateral</li> </ul>
Formas de transição ou termos de passagem		
Movimentos de massa complexos		

Fonte: Adaptado de Guidicini e Nieble (2013).

De modo resumido, a NBR 11682 (ABNT, 2009) dividiu os movimentos de massa em: escoamentos, quedas de blocos, tombamentos e escorregamentos (Figura 4). Guidicini e Nieble (2013) descrevem o escoamento como um movimento contínuo, que não necessariamente apresenta uma superfície de deslocamento definida ou uma velocidade específica, enquanto a queda de blocos se caracteriza por uma ação de queda livre a partir de uma elevação, não apresentando uma superfície de movimentação. Um tombamento é identificado por uma rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. (Highland & Bobrowsky, 2008). Já os escorregamentos são movimentos descendentes de massa e, no que se trata do plano de ruptura, podem ser subdivididos em translacionais (planos), em cunha ou rotacionais (circulares).

Segundo Gerscovich (2016) os planos de ruptura gerados a partir de escorregamentos planares, como o próprio nome sugere, são planos. Esse tipo de movimentação é típico de camadas de solo sobrejacente a um embasamento mais resistente. Já os escorregamentos com superfície de ruptura em cunha acontecem mais frequentemente em rochas quando existe uma camada mais fraca não paralela à superfície do talude e então a plano de extrusão passa a ser delimitada por um ou mais planos. Em taludes de solos relativamente homogêneos comumente ocorre o escorregamento com plano de ruptura circular, que é caracterizado por curvas em um plano bidimensional.

Figura 4- a) Escoamento; b) Escorregamento; c) Queda de blocos e d) Tombamento.



Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

## 2.4 Métodos de análise de estabilidade para ruptura circular

Os métodos de equilíbrio limite são similares e suas diferenças dependem exclusivamente de quais equações estáticas são consideradas e satisfeitas, quais forças entre fatias são compreendidas e qual a relação considerada as forças cisalhante e normal entre as fatias.

De acordo com Massad (2010), os métodos do equilíbrio limite partem do pressuposto que o material rompe bruscamente, sem apresentar deformação, além do fato das equações de equilíbrio estático serem válidas somente até a iminência da ruptura. Outro fato que pode ser observado é que o coeficiente de segurança (FS) é constante ao longo da superfície de ruptura.

Segundo Machado (2001), as análises determinísticas sobre estabilidade de taludes são feitas, geralmente, a partir dos métodos de equilíbrio limite desenvolvidos (abordados na Tabela 3), onde pode-se citar, Fellenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) e Bishop Simplificado (1995). Esses métodos são fundamentados em FS julgados adequados, onde o valor unitário indica uma ruptura iminente.

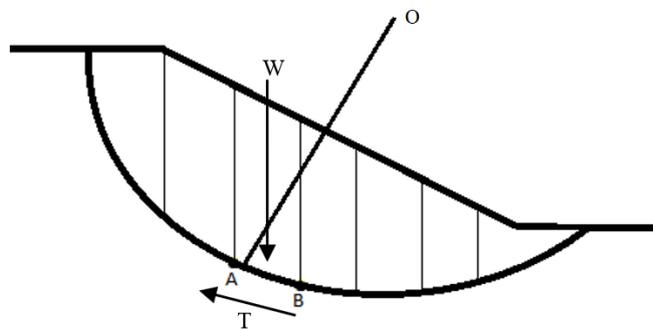
Tabela 3- Características dos métodos de equilíbrio limite.

<b>Método</b>	<b>Características</b>
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular Satisfaz o equilíbrio de momentos
Bishop (1955)	Superfície de ruptura circular Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Janbu (1973)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais
Spencer (1967)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais

Fonte: Tonus (2009).

Nos métodos de equilíbrio limite o solo potencialmente instável é dividido em fatias e a soma dos esforços resultantes em cada fatia determina o fator de segurança do talude, ou seja, adotando as tensões normais na base da fatia como sendo provocadas pelo peso de solo contido na mesma calcula-se o equilíbrio do conjunto através da equação de equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo, considerando os pesos e as forças tangenciais na base das fatias GERSCOVICH (2016). Neste trabalho foram estudados os métodos de Fellenius, Bishop e Janbu, que são apresentados a seguir.

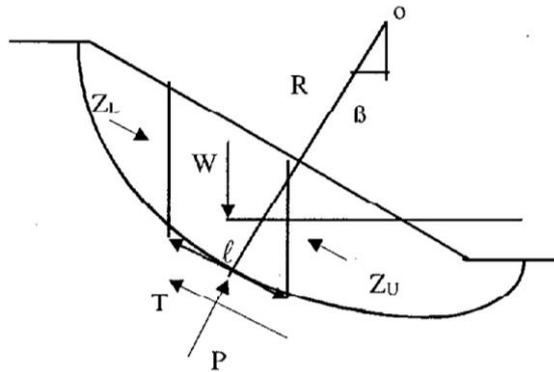
Figura 5-Divisão de um talude genérico em fatias.



Fonte: Da própria autora.

O método de Fellenius garante o equilíbrio de momentos em relação ao centro da superfície de ruptura “o” e admite que as forças resultantes entre fatias são paralelas às suas bases, não havendo interação entre as lamelas (Figura 6). Não há necessidade de que as medidas das fatias sejam as mesmas e as poropressões são desconsideradas (DAS, 2007). Segundo Borgatto (2006) este método baseia-se na análise estática do volume de material situado acima da superfície de escorregamento. Assim, determinam-se as forças normais às bases das lamelas e aplica-se o equilíbrio de forças na direção da normal à base.

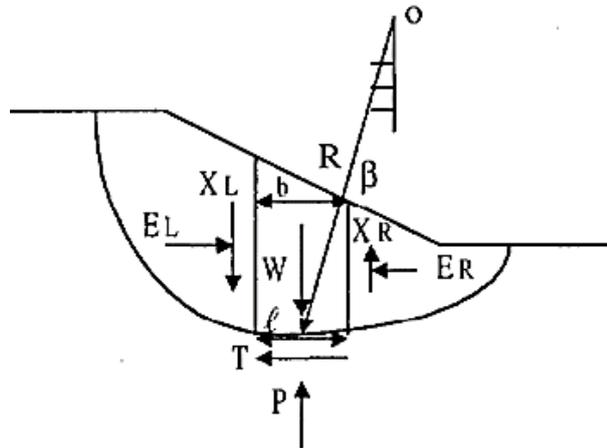
Figura 6- Método de Fellenius.



Fonte: Fernandes (2010).

O método inicialmente proposto por Bishop representa uma modificação do método de Fellenius, e admite que os esforços entre as fatias são horizontais e que um esforço normal age no centro da base da fatia e pode ser calculada a partir do somatório dos esforços verticais, desprezando os esforços horizontais (Figura 7).

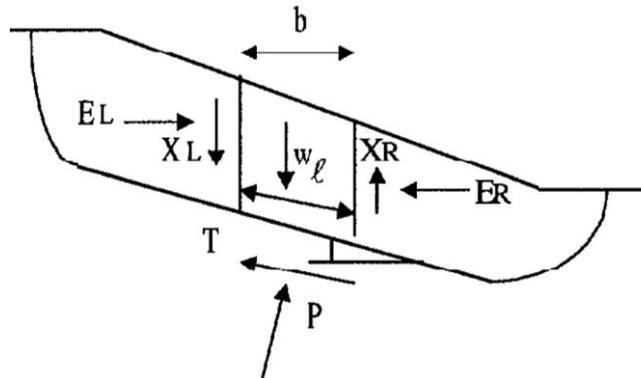
Figura 7- Método de Bishop.



Fonte: Fernandes (2010).

O método de Janbu, diferentemente dos métodos de Fellenius e Bishop, pode ser empregado em superfícies de ruptura não circulares (Figura 8). O método de Janbu Generalizado se trata de um método rígido, que considera e satisfaz todas as equações de equilíbrio. Nesse método subdivide-se a massa de solo em fatias infinitesimais e o equilíbrio de forças e momentos é realizado em cada fatia (GESRCOVICH, 2016).

Figura 8- Método de Janbu.



Fonte: Fernandes (2010).

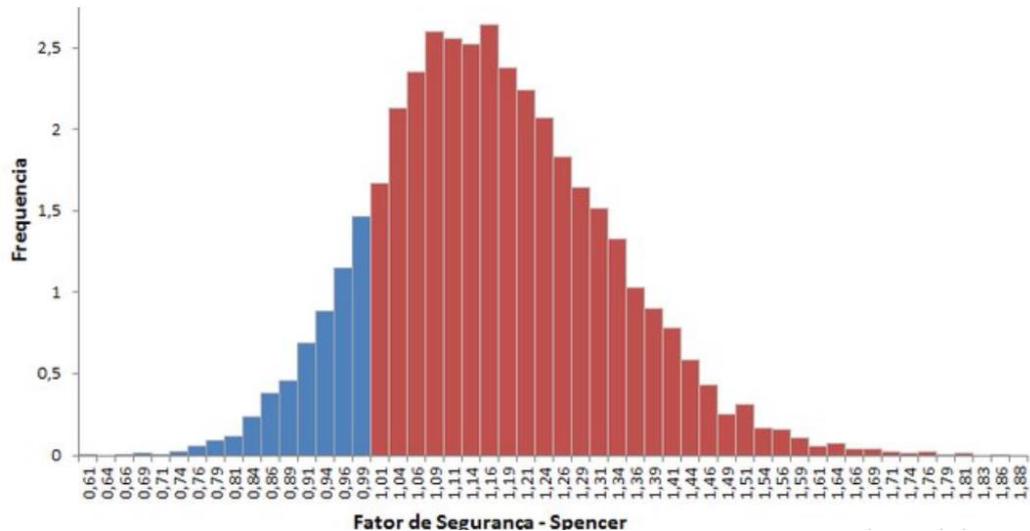
Segundo Costa (2005), essas metodologias ditas determinísticas apresentam incertezas sobre os resultados alcançados, já que utilizam simplificações da realidade e não consideram a variabilidade intrínseca decorrente da heterogeneidade e anisotropia do solo. Para levar-se em conta essa variabilidade, pode-se realizar uma análise paramétrica, onde variam-se alguns parâmetros chave de entrada, e observam-se as alterações sofridas no resultado do fator de segurança, permitindo, assim, a determinação da probabilidade de ruptura; são os Métodos Probabilísticos. Entre eles, os três frequentemente mais utilizados no meio geotécnico são: FOSM (Primeira Ordem e Segundo Momento do inglês *First Order Second Moment*), Pontos de Estimativa (Rosenblueth) e Monte Carlo. O método FOSM apresentado por Christian *et al.* (1992) baseia-se no truncamento da série de Taylor e permite quantificar a influência de cada variável aleatória na variância do FS. Porém, não se obtém uma distribuição de fator de segurança, devendo-se adotar uma função de distribuição sobre este.

O Método dos Pontos de Estimativa, proposto por Rosenblueth em 1975, dispensa o conhecimento das funções de distribuição das variáveis independentes ao assumir uma distribuição normal para os fatores de segurança, utilizando apenas seus valores calculados nos chamados pontos de estimativa (média mais desvio padrão e média menos desvio padrão). A variável dependente é calculada para estes pontos, obtendo-se uma amostra da qual se pode calcular sua média e desvio padrão. O método é de fácil aplicação (QUEIROZ, 2016).

Por fim, Apaza e Barras (2014) elucidaram que o método de Monte Carlo determina que a função de densidade de probabilidade das variáveis aleatórias seja inicialmente conhecida. A partir de então fazem-se diversas análises, por um método determinístico qualquer (Fellenius, Bishop, Janbu, etc.) e em cada uma dessas análises atribui-se um novo valor para as variáveis aleatórias a partir de sua distribuição de probabilidade. Após a

realização de inúmeras simulações, é obtido um histograma onde obtém-se uma função de distribuição de probabilidade do fator de segurança e a probabilidade de ruína da estrutura (Figura 9).

Figura 9- Exemplo de histograma de distribuição de probabilidade do FS obtido pela aplicação do método de Monte Carlo.



Fonte: Apaza e Barras (2014).

Um dos problemas na aplicação do método de Monte Carlo é a possibilidade de haver uma dificuldade na determinação da superfície crítica de ruptura já que a incerteza sobre os parâmetros de entrada contribui para o valor obtido de FS. Usualmente, é definido que a superfície de deslizamento crítica é aquela obtida a partir de um método determinístico, uma vez que independe dos dados de entrada, logo as duas superfícies de ruptura crítica obtidas pelos métodos determinísticos e probabilísticos tendem a coincidir (EL RAMLY, 2002).

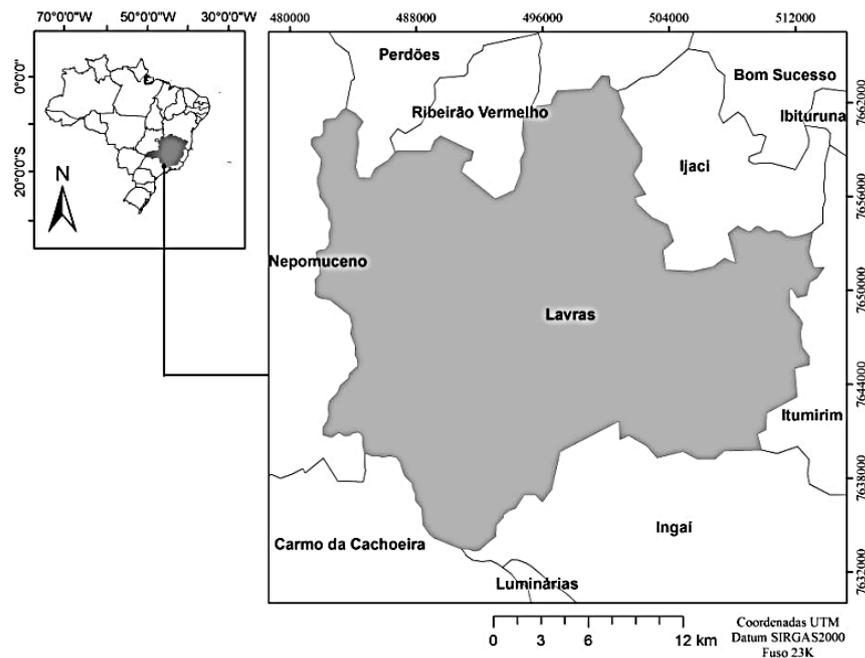
Em contrapartida, diversas vantagens são observadas com a aplicação do método quando comparado aos anteriormente citados: além de fornecer a curva de distribuição estatística do fator de segurança e a curva de convergência de probabilidade de ruína, permite também a análise probabilística de diversos parâmetros geotécnicos para solos diferentes (APAZA & BARRAS, 2014).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O município de Lavras encontra-se localizado ao sul do estado brasileiro de Minas Gerais e possui uma área aproximada de 565 km<sup>2</sup>, em região chamada de Campo das Vertentes. Fazem parte de seus limites as cidades de Ribeirão Vermelho, Perdões, Nepomuceno, Carmo da Cachoeira, Ingai, Itumirim e Ijaci e possui uma população de cerca de 92.200 pessoas (IBGE, 2010). A cidade está localizada entre as latitudes 7.633.374 e 7.663.995 m e longitudes 481.296 e 514.065, possui clima temperado com inverno seco e verão chuvoso (DANTAS, 2007).

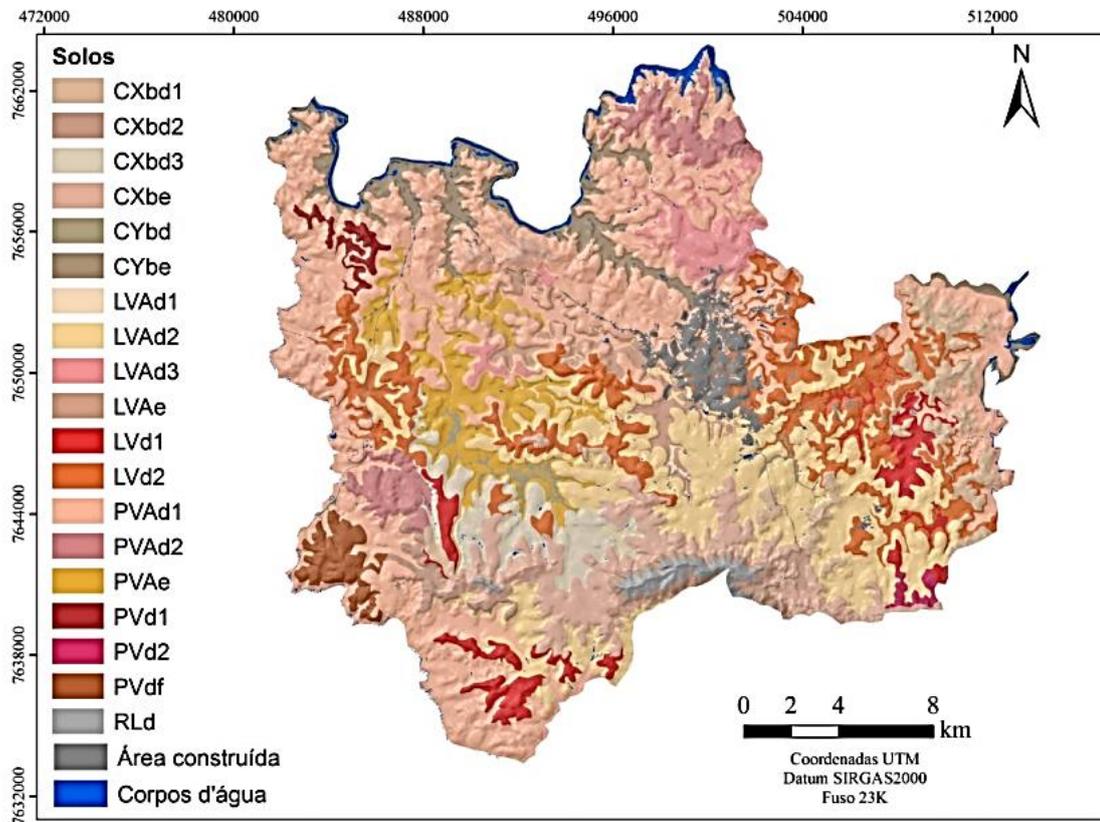
Figura 10- Localização e delimitação do município de Lavras no estado de Minas Gerais.



Fonte: Silva (2017).

Silva (2017), executou o levantamento pedológico do município de Lavras-MG por meio de técnicas de geoprocessamento, o que evidenciou o predomínio de Argissolos, seguidos por Latossolos, perfazendo juntos 72% da área total do município.

Figura 11- Mapa pedológico do município de Lavras-MG.



Fonte: Silva (2017).

### 3.2 Área estudada e geometria adotada

Visando uma diminuição geral das perdas humanas e materiais, o Governo Federal, em parceria com os Ministérios da Integração Nacional, das Cidades, de Ciência e Tecnologia, da Defesa e de Minas e Energia firmaram convênios de colaboração mútua para executar em todo o país o diagnóstico e mapeamento das áreas com potencial de risco alto a muito alto para movimentos de massa.

O levantamento foi executado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, e a partir desse mapeamento foi gerada a Tabela 4 que apresenta os dez locais de risco de deslizamento identificados durante os trabalhos de campo realizados entre os dias 04 e 07 de agosto de 2015, no município de Lavras-MG.

Tabela 4-Síntese dos setores de risco alto e muito alto.

<b>Bairro</b>	<b>Local</b>	<b>Tipologia do Processo</b>	<b>Potencial de Risco</b>
São Vicente	Rua Agnésio de Carvalho Souza	Deslizamento e erosão	Alto Risco
Jardim Europa	Rua José Mesquita	Deslizamento	Alto Risco
Retiro	Acesso no fim da Rua Zequinha Viléia	Deslizamento	Alto Risco
Retiro	Rua Prof. Orozimbo	Deslizamento	Alto Risco
Jardim das Magnólias	Rua Irmã Genésia	Deslizamento	Muito Alto Risco
Dona Julieta	Rua Nazaré Alves Teixeira	Deslizamento	Risco Potencial
Água Limpa II	Rua Emerson dos Santos	Deslizamento	Alto Risco
Belizandra	Rua Geraldo Teodoro Rezende	Deslizamento	Alto Risco
São Vicente	Rua Agnésio de Carvalho Souza	Deslizamento e erosão	Alto Risco
Nilton Teixeira (Jardim das Acácias II)	Rua 1º de maio	Deslizamento	Alto Risco

Fonte: Adaptado de Goes & Lopes (2015).

Foi pontuado que 100% dos casos levantados de possível deslizamento ocorreram devido a alguma intervenção humana, na maioria dos casos o processo se iniciou devido à execução de corte na base do talude (GOES & LOPES, 2015).

Dentre as regiões mapeadas, a escolhida para análise foi o levantamento do bairro Nilton Teixeira que possui informações suficientes para a realização do estudo. Uma vez em posse do mapeamento pedológico realizado por Silva (2017), o talude em análise foi considerado como sendo homogêneo.

Este talude apresenta um trecho cimentado com trincas e vegetação, além de lixo e entulhos lançados em sua crista o que mobiliza todo material em direção as casas em períodos chuvosos. Observa-se, ainda, concentração pluvial na encosta nessa área (GOES & LOPES, 2015). A vertente pode ser observada na Figura 12.

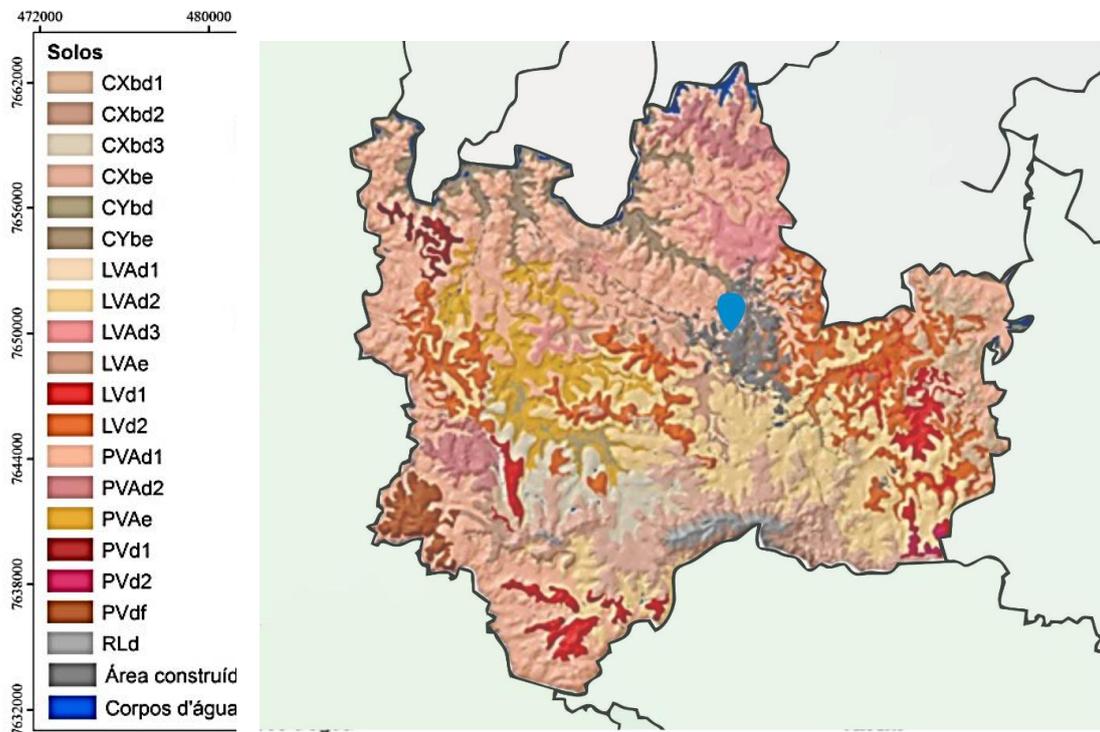
Figura 12- Área de análise no bairro Nilton Teixeira.



Fonte: Goes & Lopes (2015).

Ao sobrepor o mapa da região em que se encontra o talude estudado com o mapa pedológico da cidade de Lavras, é possível perceber que a zona de risco de deslizamento do bairro Nilton Teixeira se encontra localizada sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13- Sobreposição de mapas para determinação do tipo de solo do talude localizado no bairro Nilton Teixeira.

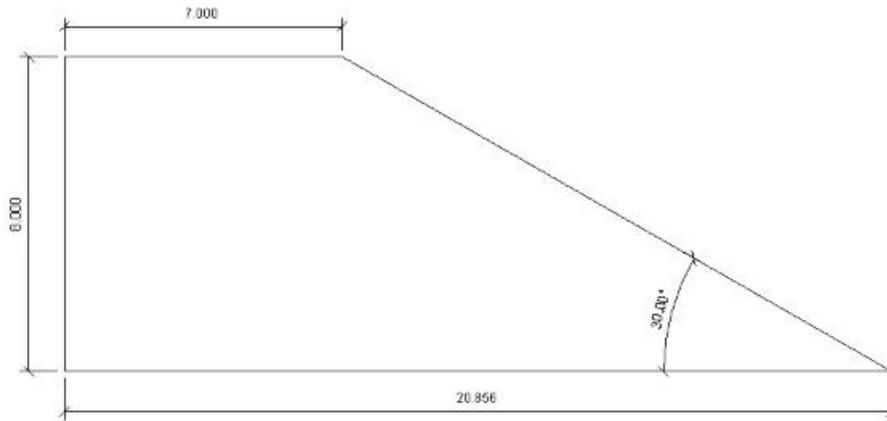


Fonte: Adaptado de Silva (2017).

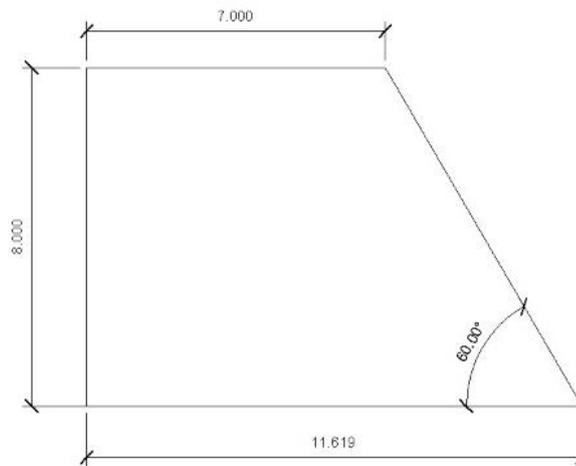
Goes e Lopes (2015), ao analisarem a zona potencial de deslizamento no bairro Nilton Teixeira descreveram a amplitude da encosta do talude como tendo cerca de oito metros e inclinação entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ . Com a intenção de averiguar a estabilidade da seção mais crítica, verificou-se o FS em duas seções distintas do talude. Uma com a média inclinação seção A ( $30^\circ$ ), e outra com a maior inclinação do talude, seção B ( $60^\circ$ ), ambas com altura de 8 metros. Na falta de maiores informações, foi adotada a largura de crista de 7 metros para ambas as seções.

Figura 14- Seção A e seção B, respectivamente, referentes ao talude localizado no bairro Nilton Teixeira.

a)



b)



Fonte: Da própria autora.

### 3.3 Nível de água

Como dito anteriormente, as precipitações intensas influenciam diretamente nos deslizamentos na região de Lavras/MG. Dependendo da elevação do nível de água adotada no terreno, ocorre a redução do fator de segurança, ou seja, quanto mais próximo à superfície pior é a condição de estabilidade. Desta maneira o valor a ser considerado pode ser baseado na média local, verificada por meio de informações de sondagens já realizadas no município.

Teixeira (1997), executou em seu estudo o levantamento de dados de 352 furos de sondagem executados na cidade de Lavras/MG, foi observado por ele que a tradição regional

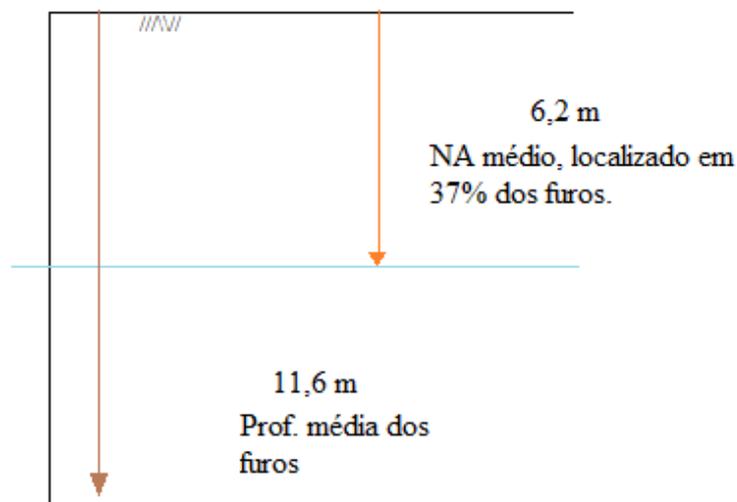
limita a profundidade dos furos de sondagem em 20 metros, o tratamento estatístico desses dados, assim reunidos, constituiu da obtenção de médias e desvio-padrão dos SPTS para cada metro, definindo assim o perfil característico do subsolo do município como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5- Perfil característico do subsolo do município de Lavras.

<b>Cidade</b>	<b>Nº de furos</b>	<b>Nº de camadas</b>	<b>Profundidade média do NA (m)</b>	<b>Desvio padrão do NA</b>	<b>Profundidade média dos furos</b>
Lavras	352	2	6,2	5,4	11,6

Fonte: Adaptado de Teixeira (1997).

Figura 15- Perfil representativo da cidade de Lavras.



Fonte: Adaptado de Teixeira (1997).

### 3.4 Parâmetros geotécnicos e probabilísticos de resistência do solo

Uma vez que não foi possível realizar ensaios de resistência ao cisalhamento na universidade, as propriedades geotécnicas necessárias para as análises de estabilidade foram obtidas a partir de estudos realizados por Rocha (2002).

O estudo em questão foi desenvolvido a partir de amostras das seguintes classes de solos de Lavras, segundo classificação pedológica: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), latossolo Vermelho distrófico (LVd), latossolo Vermelho distroférico (LVdf), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVAd) e Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (CXbd) e os resultados obtidos por ele podem ser observados abaixo.

Tabela 6-Densidade do solo ( $D_s$ ), umidade na sucção de 0,01 MPa ( $U$ ), quantidades de argila e areia e resultados do ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas coletadas na profundidade de 0 a 0,03 m, para a umidade a -0,01 MPa.

Classe de solo	Densidade do solo	Argila	Areia	Silte	Umidade a - 0,01MPa	Ângulo de atrito interno	Coesão aparente
	Kg/dm <sup>3</sup>	g/kg	g/kg	g/kg	kg/kg		kPa
<b>LVdF</b>	1,15	570	160	270	0,21	23,75	12,56
<b>LVd</b>	1,12	570	250	180	0,22	6,30	38,39
<b>LVAd</b>	1,31	310	460	230	0,29	11,30	40,68
<b>PVAd</b>	1,29	370	390	240	0,28	7,80	42,39
<b>CXbd</b>	1,19	396	150	460	0,25	8,97	33,39

Fonte: Reproduzido de Rocha (2002).

Segundo afirmação de Crestani (2018) quantificar as incertezas presentes em um estudo geotécnico é penoso, já que muitas vezes os dados fornecidos são insuficientes para executar uma análise rígida. Neste sentido, pode-se utilizar como referências valores apresentados em literatura que auxiliam na determinação dos dados de entrada e na identificação da forma de distribuição das variáveis aleatórias.

Lacasse e Nadim (1998) definiram intervalos de Coeficiente de variação (Cov), também conhecido como desvio padrão, para parâmetros do solo, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7- Valores e padrões para Cov.

<b>Parâmetro do solo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Cov (%)</b>
Peso específico	$\gamma$	3-8
Ângulo de atrito (areias)	$\phi$	2-13
Ângulo de atrito (argilas)	$\phi$	10-50

Fonte: Adaptado de Lacasse e Nadim (1998).

Os parâmetros geotécnicos necessários à obtenção da resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito interno e coesão), como também, as características físicas e granulométricas do material que compõem o talude analisado, foram retiradas da Tabela 6. O peso específico do solo foi obtido ao realizar a multiplicação do valor de densidade (Tabela 6) com a aceleração da gravidade.

Para a área de risco localizada no bairro Nilton Teixeira sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, de acordo com os ensaios realizados por Rocha (2002), tem-se um ângulo de atrito de  $7,8^\circ$  e uma coesão aparente de 42,39 kPa.

No procedimento de verificação do FS, foi utilizado o software SLOPE/w que permite a utilização e comparação dos FSs dos métodos probabilísticos e determinísticos anteriormente citados, considerando diferentes superfícies de ruptura e poropressão. Primeiramente foi realizada a verificação da estabilidade de ambas as seções do talude por meio dos métodos determinísticos de Bishop, Fellenius e Janbu, nas condições secas, na presença de água e saturada. Em seguida, considerou-se como FS o resultado mais crítico pelo método determinístico e este foi comparado ao resultado mais crítico pelo método probabilístico de Monte Carlo nas condições secas, na presença de água e saturada.

A variabilidade referente aos parâmetros coesão e ângulo de atrito foi obtida a partir dos dados bibliográficos apresentados na Tabela 7, o que tende a elevar a incerteza.

Baseado na Tabela 7, foi adotado um coeficiente de variação (Cov) de 2% para o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), uma vez que o argissolo vermelho-amarelo distrófico típico em questão apresenta um maior percentual de areia em sua composição. Utilizando como referência os estudos de Bressani e Costa (2005), adotou-se um Cov de 15% para o valor de coesão (Tabela 8).

Tabela 8- Variabilidade referente aos parâmetros coesão e ângulo de atrito.

Parâmetro	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Média	42,3900	7,800
Desvio Padrão	6,3585	0,156
Coefficiente de variação (Cov) %	15	02

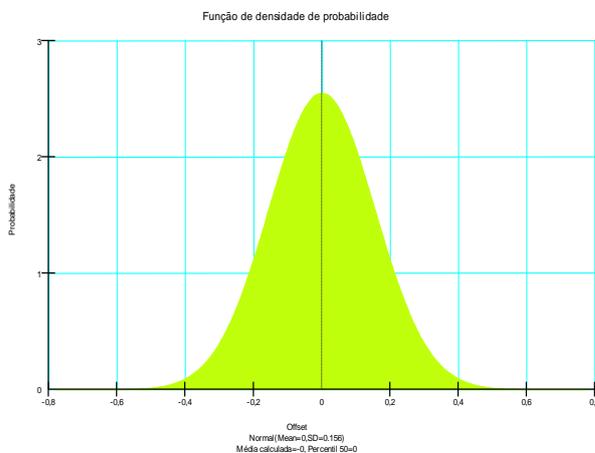
Fonte: Da própria autora.

Mostyn e Li (1993) afirmam que muitos pesquisadores assumem  $c$  e  $\phi$  como variáveis independentes, mesmo que essa suposição não esteja verdadeiramente correta, já que essa proposição simplifica a análise das incertezas.

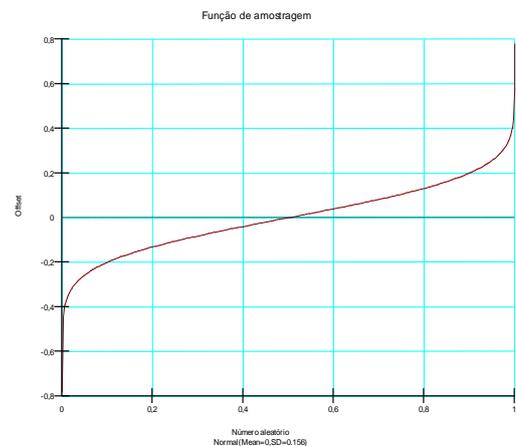
As variações mínimas e máximas para o ângulo de atrito foram limitadas a  $-0,78^\circ$  e  $0,78^\circ$ , ou seja, o ângulo de atrito do talude será distribuído normalmente entre  $7,02^\circ$  e  $8,58^\circ$ . A mostra de densidade de probabilidade e a função de amostragem correspondente para o ângulo de atrito do talude durante a simulação de Monte Carlo podem ser vistas na Figura 16.

Figura 16- a) Densidade de probabilidade e b) Função de amostragem para a variável ângulo de atrito.

a)



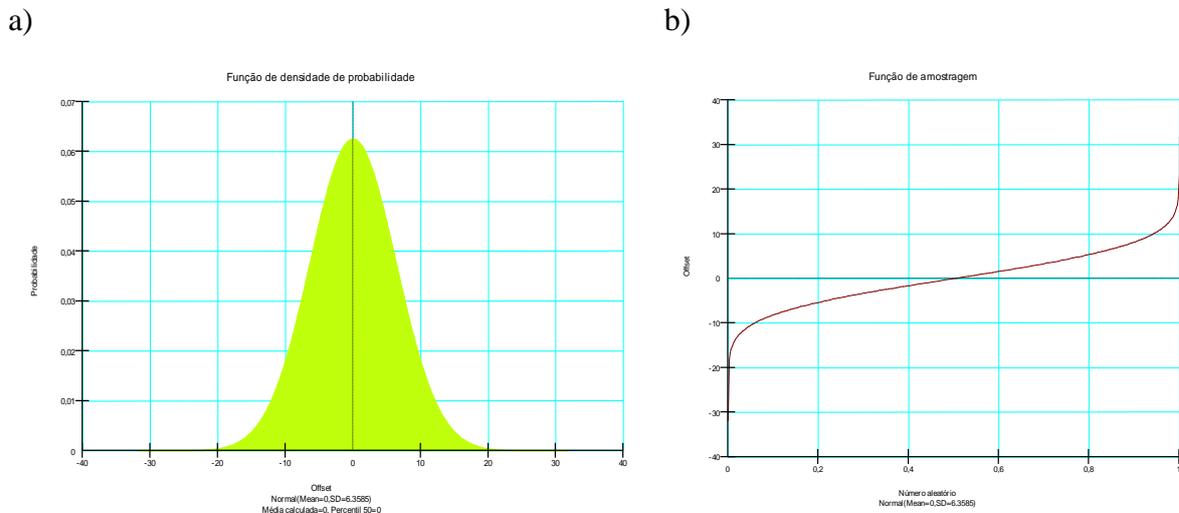
b)



Fonte: Da própria autora.

O mesmo foi feito para a coesão, onde o desvio padrão estipulado foi de 6,4 kPa e as variações mínimas e máximas foram limitadas a -31,8 kPa e 31,8 kPa, ou seja, a coesão do talude será distribuída normalmente entre 10,6 kPa e 74,2 kPa. A função de densidade de probabilidade e a função de amostragem correspondente para a coesão do talude durante a simulação de Monte Carlo podem ser vistas na Figura 17.

Figura 17- a) Densidade de probabilidade e b) Função de amostragem para a variável coesão.



Fonte: Da própria autora.

O talude foi dividido em 100 fatias e foram realizadas 2000 iterações para a simulação de Monte Carlo, considerando uma diferença tolerável de 0,01% para o valor FS obtido. O método de Monte Carlo foi então utilizado para obter a probabilidade de ruptura ( $Pr$ ), e o índice de confiabilidade considerando a variabilidade dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito.

Segundo Bressani e Costa (2005), o FS médio obtido a partir das iterações de Monte Carlo geralmente é próximo do fator de segurança mínimo determinístico. Já o índice de confiabilidade é um modo de normatizar o FS no que se refere a sua incerteza, medindo o número de desvios padrão que separam o fator de segurança médio do valor definido para a ruptura ( $FS = 1,0$ ). Logo, se as incertezas do problema forem elevadas, o fator de segurança médio necessário para obter o mesmo índice de confiabilidade será maior.

### 3.5 *Software* utilizado e análises realizada

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizado o *software* de elementos finitos Slope/W da Geo-Studio em sua versão teste gratuita. Por meio do software é possível realizar análises determinísticas de estabilidade de taludes a partir da teoria do equilíbrio limite, empregando métodos de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, U.S. Corps of Engineers e Lowe-Karafiath, onde pode-se considerar diferentes materiais, geometrias, superfícies de ruptura complexas, a influência das pressões neutras, e até mesmo sismos. O programa também permite ao usuário a realização de uma análise probabilística onde considera-se a variabilidade dos parâmetros em questão.

Uma análise probabilística pode ser realizada facilmente com SLOPE / W quando a variabilidade das propriedades do solo ou outros parâmetros de entrada são conhecidos. Embora o programa SLOPE / W permita vários tipos de distribuição, a abordagem mais comum é assumir uma distribuição normal com um valor médio especificado e desvio padrão de um parâmetro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise determinística na condição seca

Em cada uma das seções foram feitos três tipos de análises em relação ao método determinístico utilizado, determinando-se o FS através dos métodos de Bishop, Fellenius e Janbu, respectivamente. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 9 , Figura 18 e Figura 19.

Para a definição da superfície de pesquisa a ser estudada pelo software, foi selecionado o método de Entrada e Saída, segundo o manual do SLOPE/W, uma das dificuldades com o histórico método Grade e Raios é a complexidade de se visualizar as extensões e/ou a gama de superfícies de pesquisa (ou deslizamento). Esta limitação foi superada pelo método aplicado que especifica o local onde as superfícies de deslizamento provavelmente entrarão na superfície do solo e onde elas sairão, sendo o intervalo de entrada formado por toda a crista do talude, e o intervalo de saída formado pelo corpo do talude.

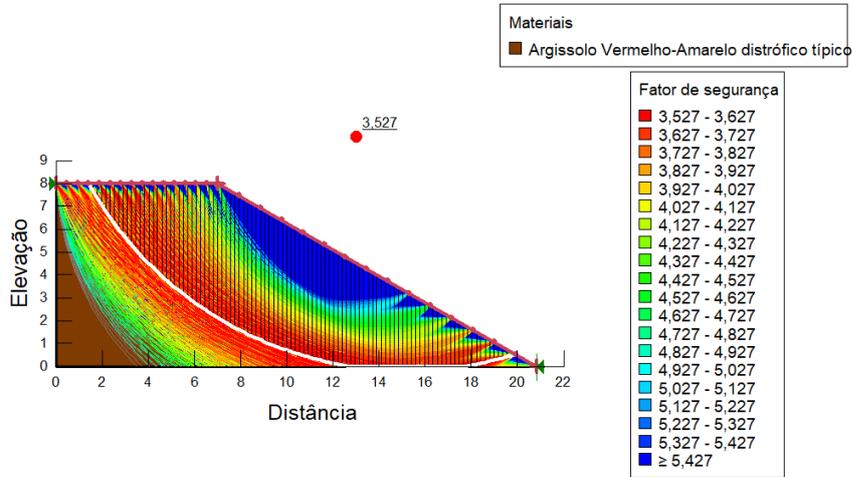
Tabela 9- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na condição seca.

<b>Método</b>	<b>FS Seção A</b>	<b>FS Seção B</b>
Bishop	3,527	2,419
Fellenius	3,497	2,432
Janbu	3,419	2,548

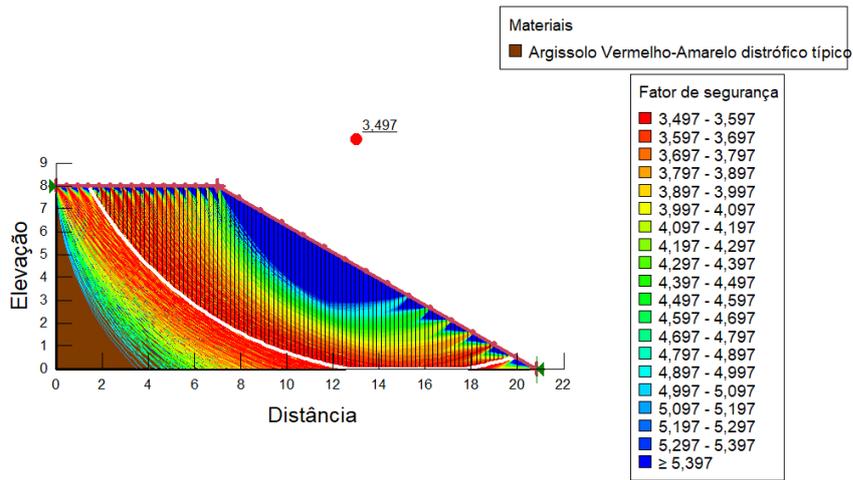
Fonte: Da própria autora.

Figura 18- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

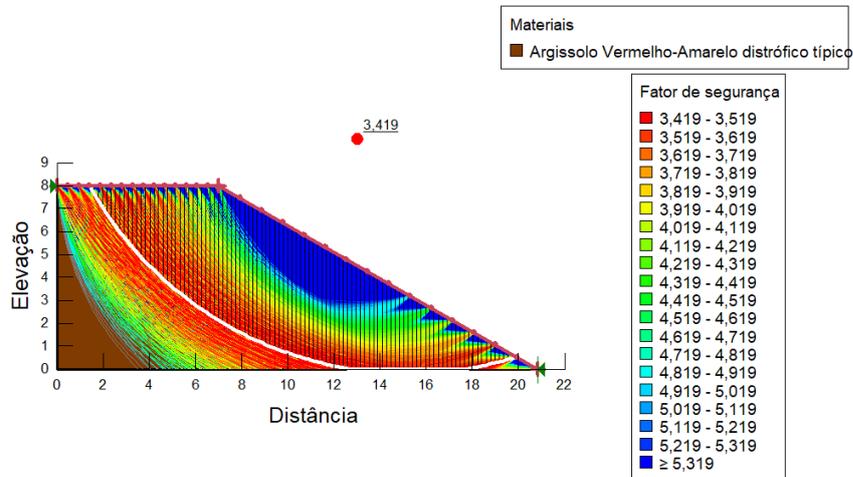
a)



b)



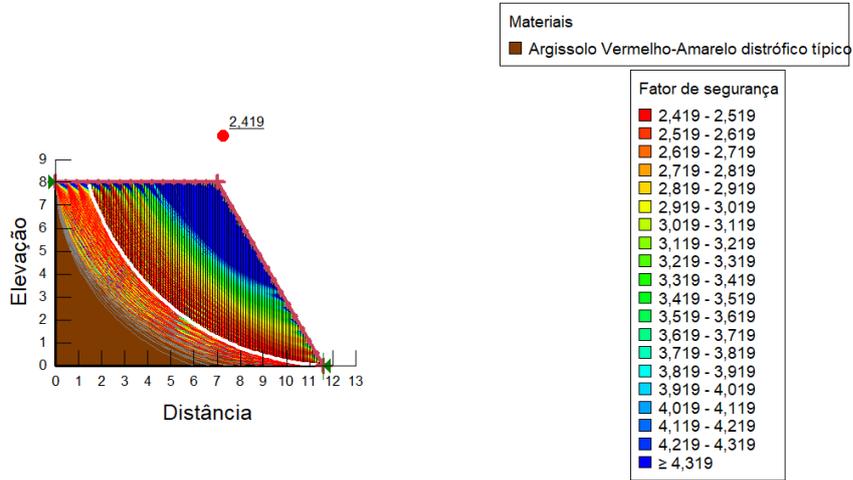
c)



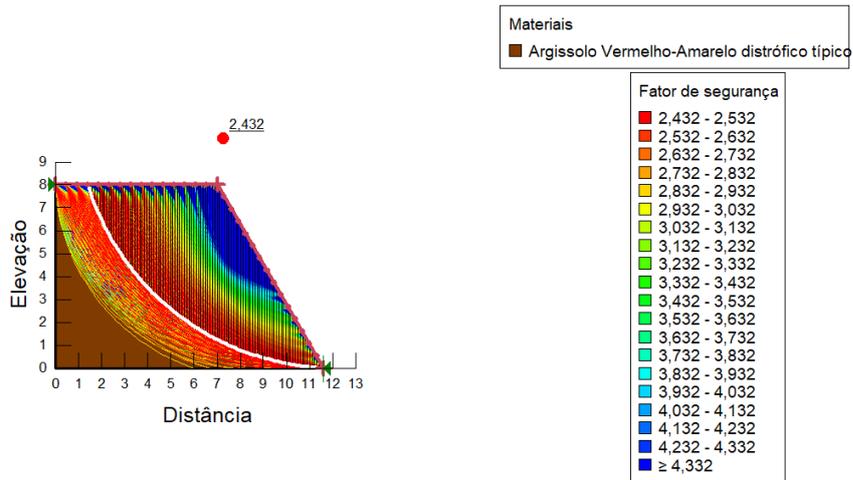
Fonte: Da própria autora.

Figura 19- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B seca.

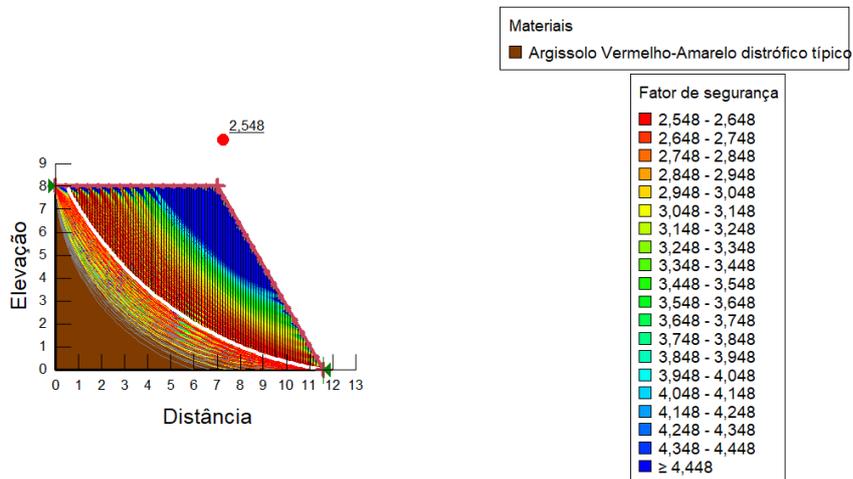
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora.

## 4.2 Análise determinística na presença de água

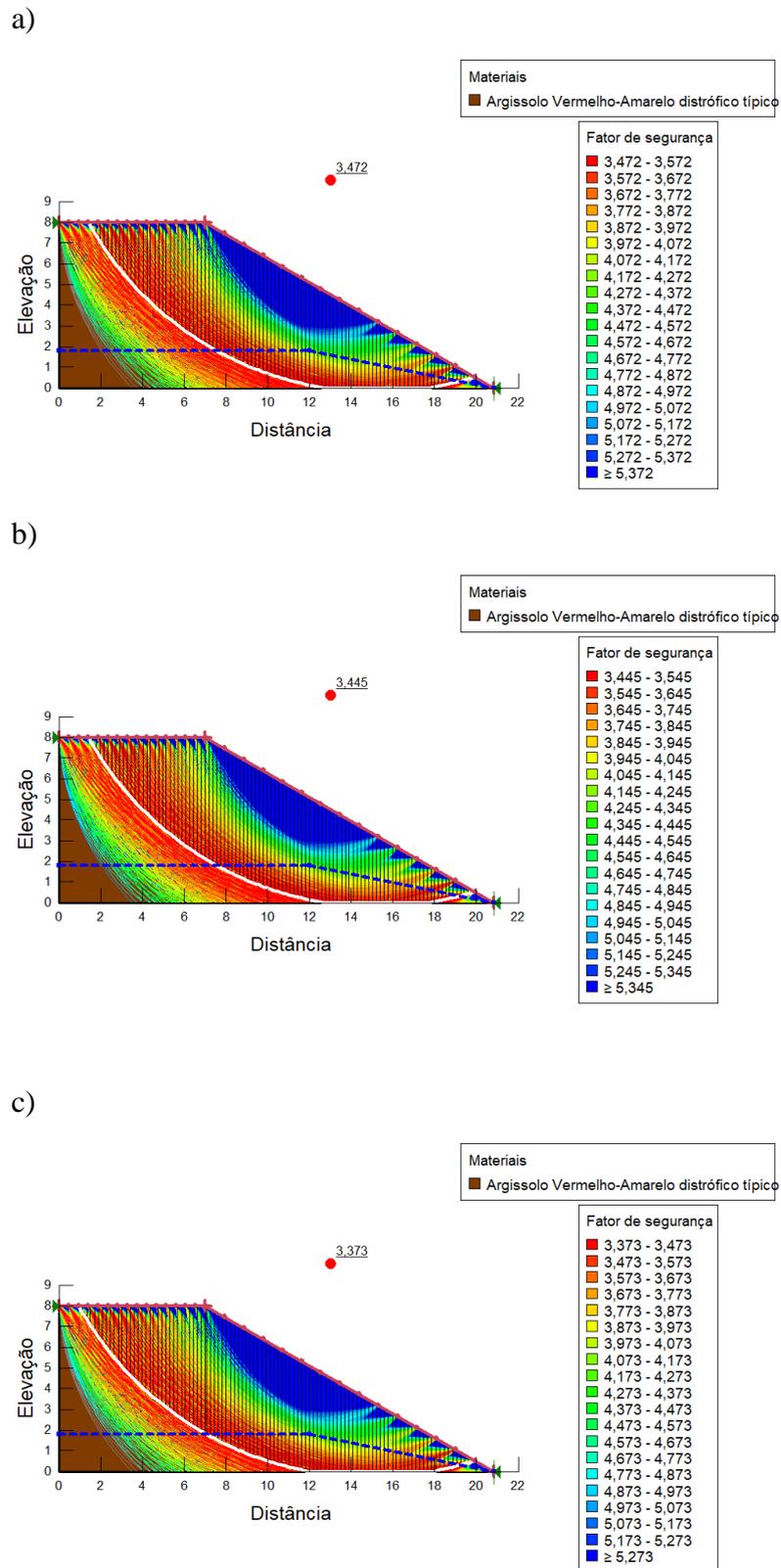
Levando-se em conta os estudos de Teixeira (1997), inseriu-se uma linha piezométrica hipotética na profundidade de 6,2 m da crista das seções do talude em questão para verificar-se o comportamento da vertente na presença de água. Os resultados podem ser observados nas Tabela 10, Figura 20 e Figura 21.

Tabela 10- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na presença de água a 1,8 metros.

<b>Método</b>	<b>FS Seção A</b>	<b>FS Seção B</b>
Bishop	3,472	2,398
Fellenius	3,445	2,415
Janbu	3,373	2,536

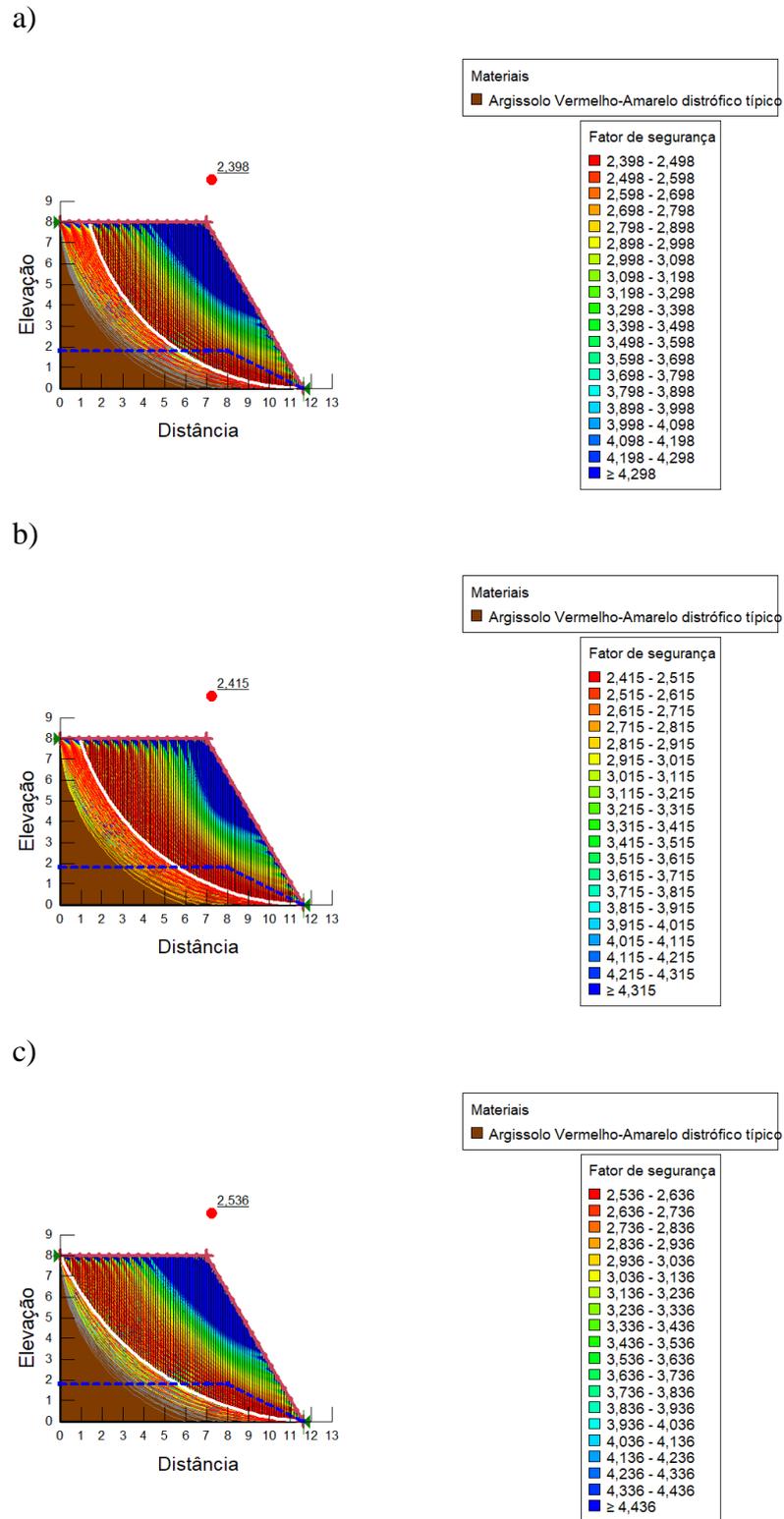
Fonte: Da própria autora.

Figura 20- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na presença de água.



Fonte: Da própria autora.

Figura 21- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na presença de água.



Fonte: Da própria autora.

### 4.3 Análise Determinística na condição saturada

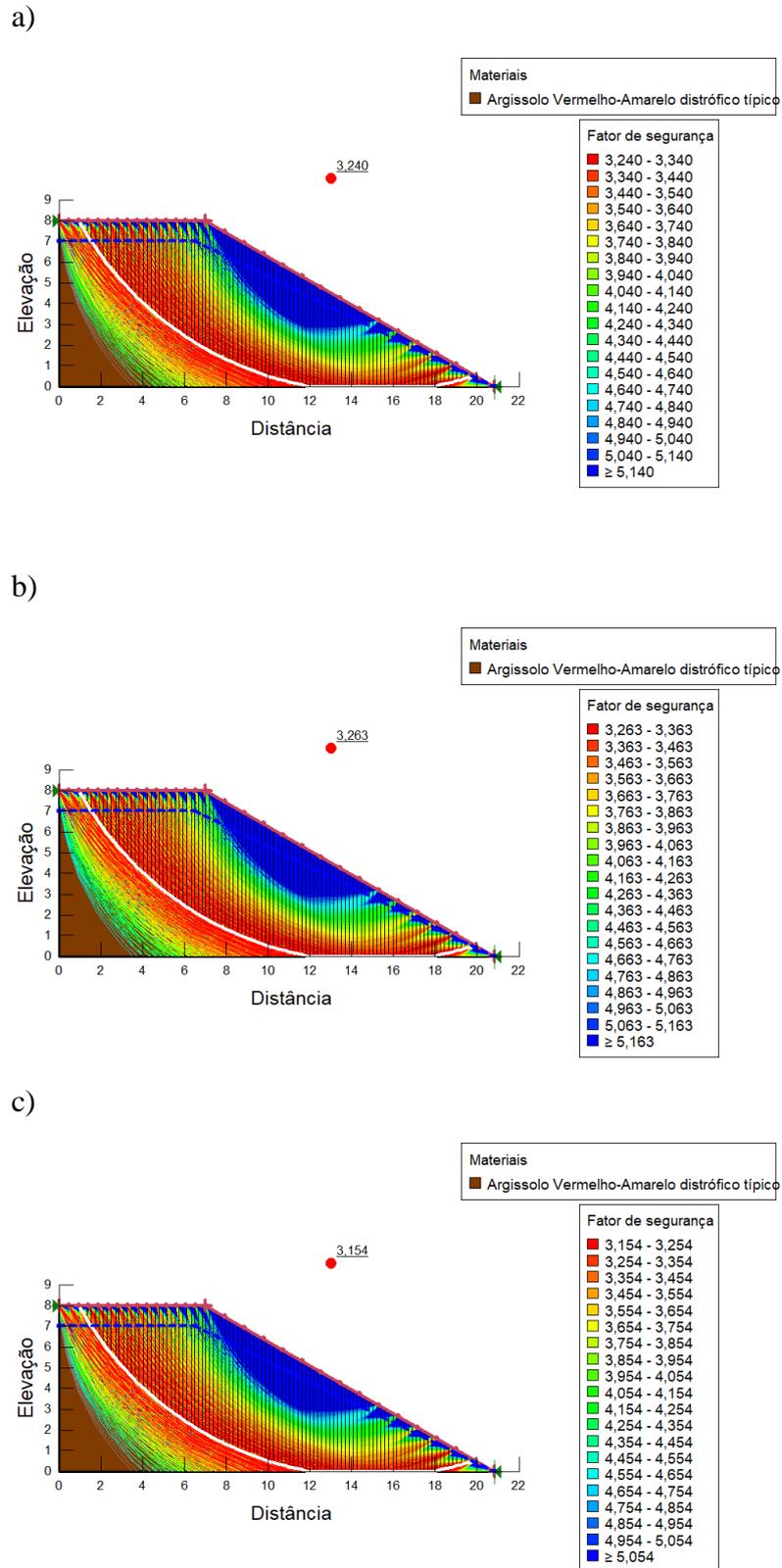
Afim de se observar a influência do nível d'água no FS optou-se por realizar mais uma análise considerando o talude saturado, os resultados podem ser observados nas Tabela 11, Figura 22 e Figura 23.

Tabela 11- FS obtido a partir de métodos determinísticos para as seções A e B do talude na condição saturada.

<b>Método</b>	<b>FS Seção A</b>	<b>FS Seção B</b>
Bishop	3,240	2,198
Fellenius	3,263	2,286
Janbu	3,154	2,337

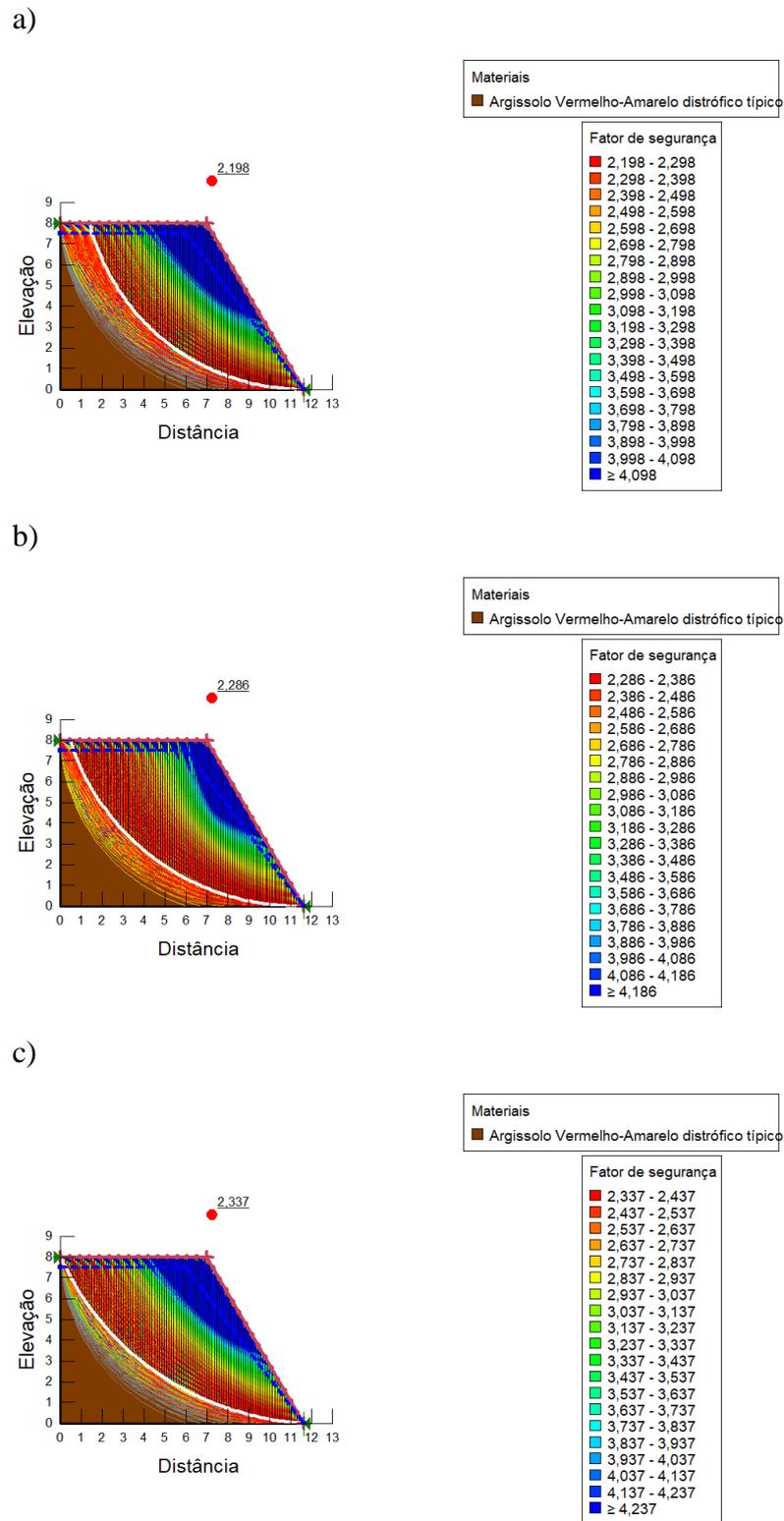
Fonte: Da própria autora.

Figura 22- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição saturada.



Fonte: Da própria autora.

Figura 23- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição saturada.



Fonte: Da própria autora.

#### 4.4 Análise probabilística na condição seca

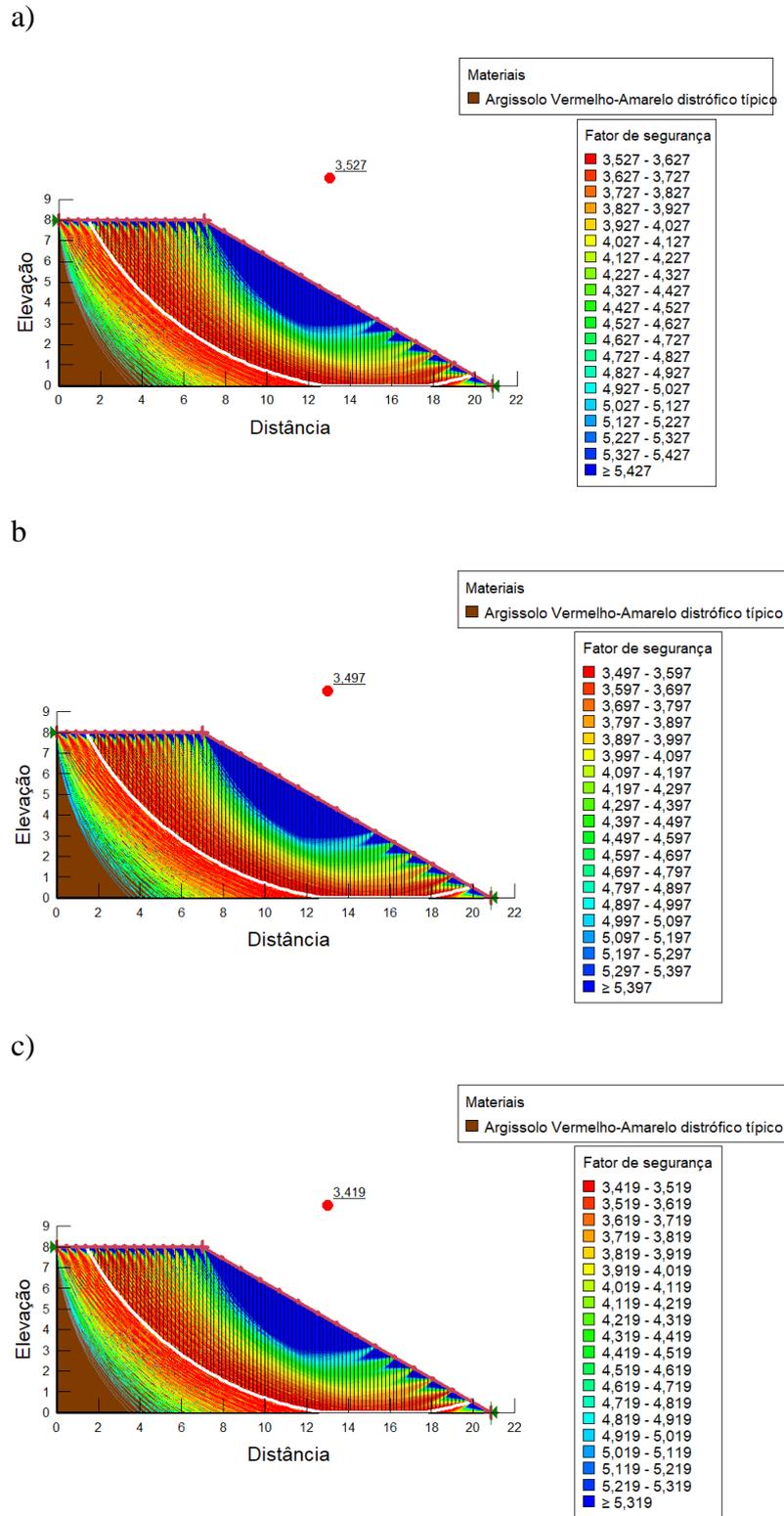
Para a realização da análise probabilística de estabilidade das seções A e B do talude em questão, nas três condições anteriormente determinadas, foram realizadas 2000 simulações de Monte Carlo para cada um dos métodos de análise. Foram então obtidos fatores de segurança médio, mínimo e máximo; desvio padrão; índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura. Os resultados obtidos para a seção A do talude para a condição seca ser observados na Tabela 12.

Tabela 12- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na condição seca.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	3,527	3,497	3,419
Fator de segurança mínimo	1,23899	1,225194	1,1980157
Fator de segurança máximo	5,7887558	5,2086326	5,0971505
Desvio padrão	0,47388425	0,47046443	0,46171859
Índice de confiabilidade	5,3437301	5,292996	5,2242284
Probabilidade de ruptura	0	0	0

Fonte: Da própria autora.

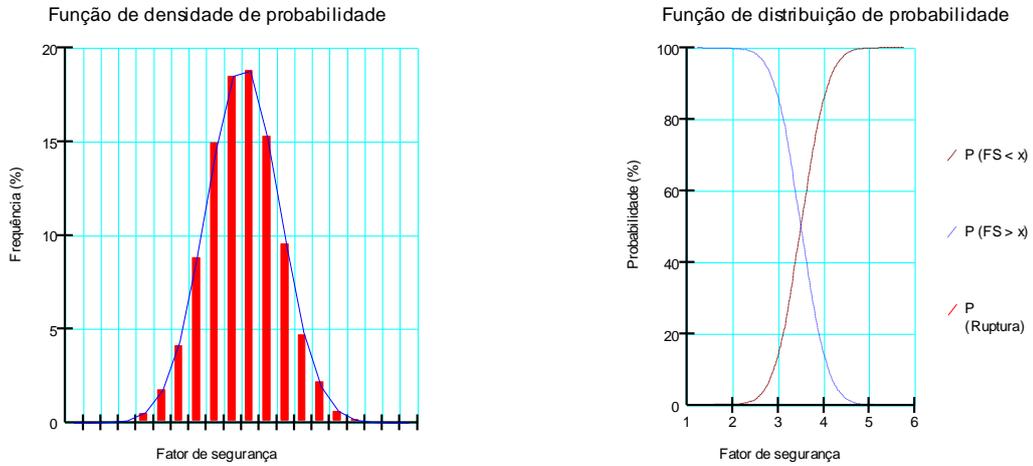
Figura 24- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição seca.



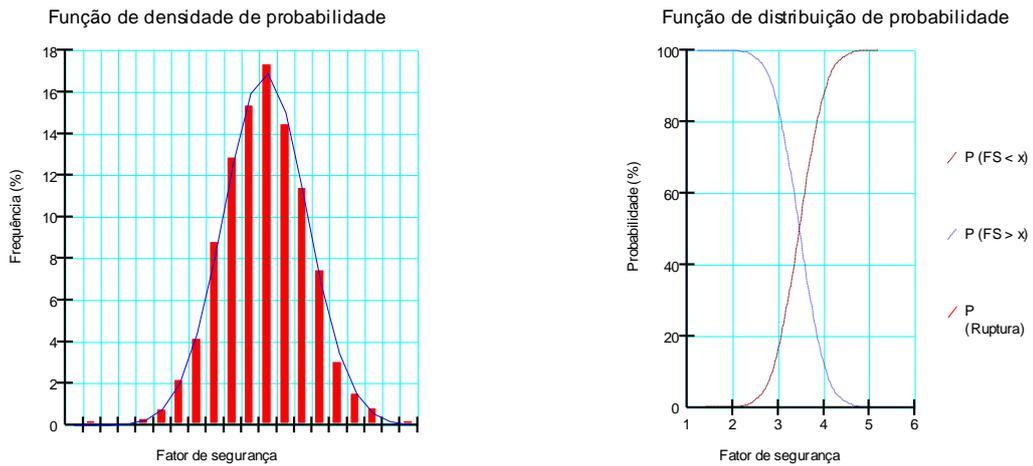
Fonte: Da própria autora.

Figura 25- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na condição seca pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

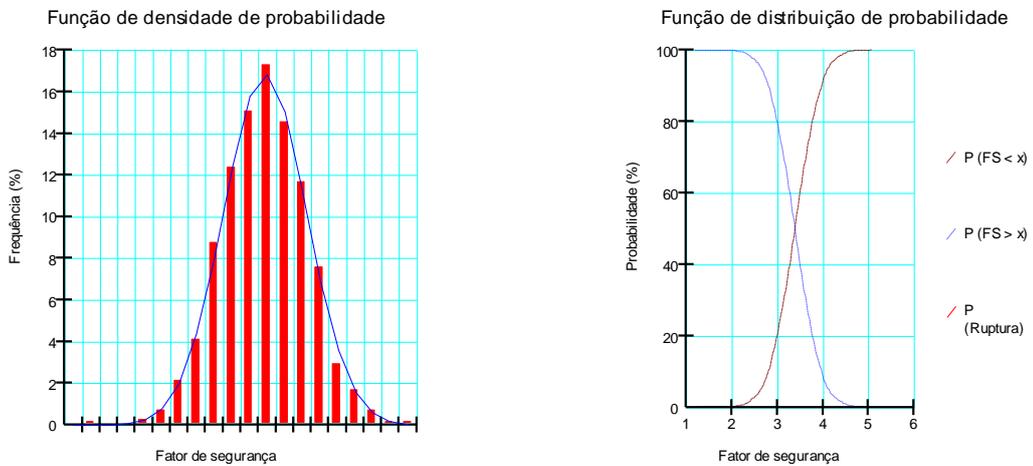
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora.

O mesmo procedimento foi realizado para a seção B do talude, cujos resultados encontram-se na Tabela 13 e Figura 26.

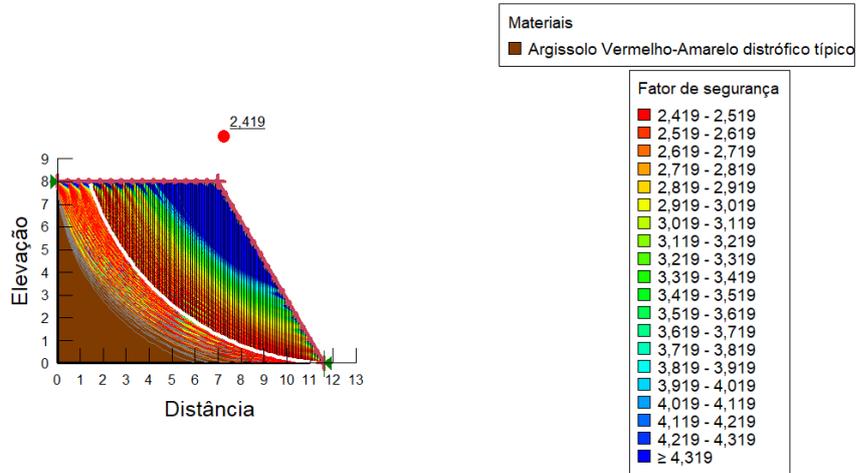
Tabela 13- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na condição seca.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	2,419	2,432	2,548
Fator de segurança mínimo	0,82396951	0,8258186	0,84895832
Fator de segurança máximo	3,6277847	3,6431351	3,8421251
Desvio padrão	0,33172401	0,33278393	0,35214139
Índice de confiabilidade	4,2622077	4,2875301	4,3878867
Probabilidade de ruptura	0,001	0,001	0,0005

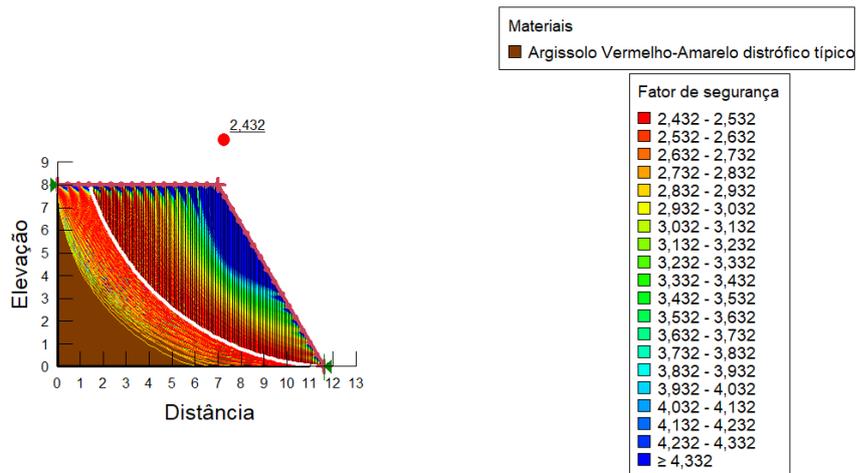
Fonte: Da própria autora.

Figura 26- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição seca.

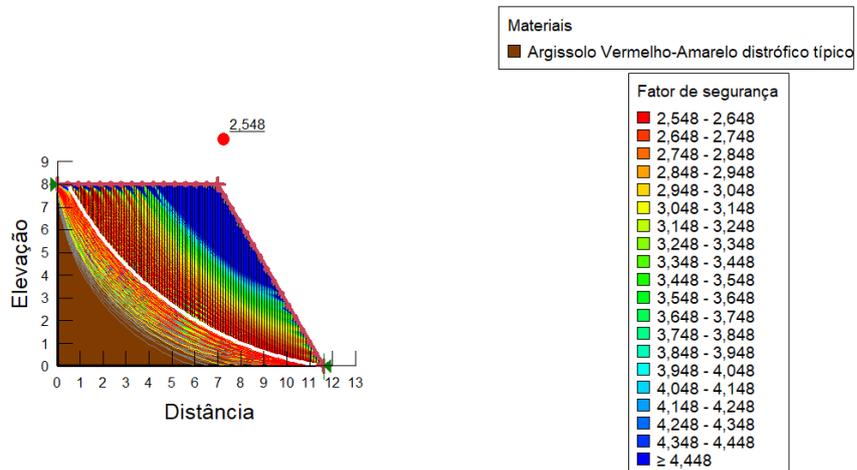
a)



b)



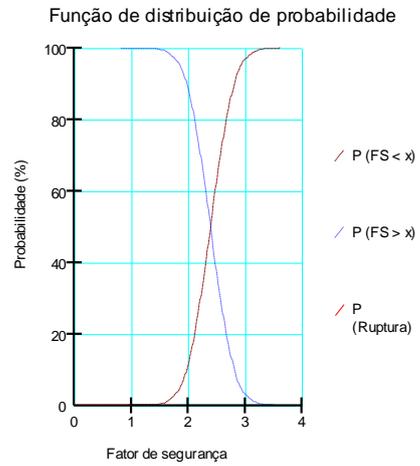
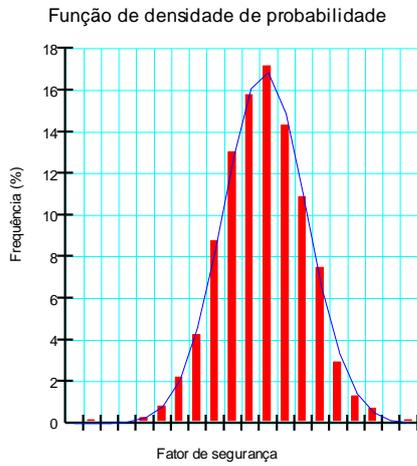
c)



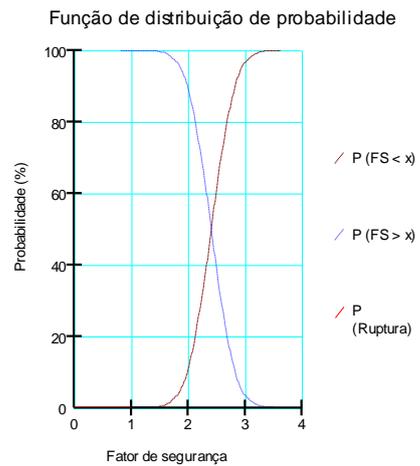
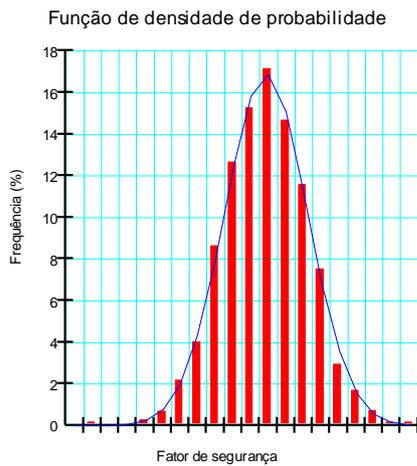
Fonte: Da própria autora.

Figura 27- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na condição seca pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

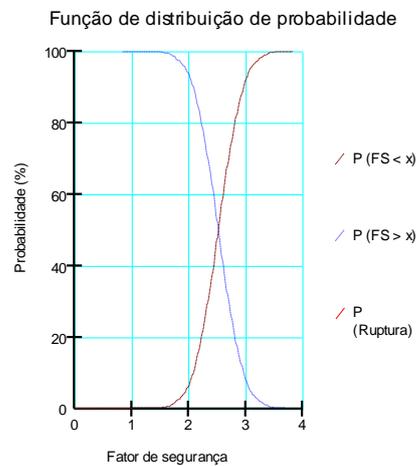
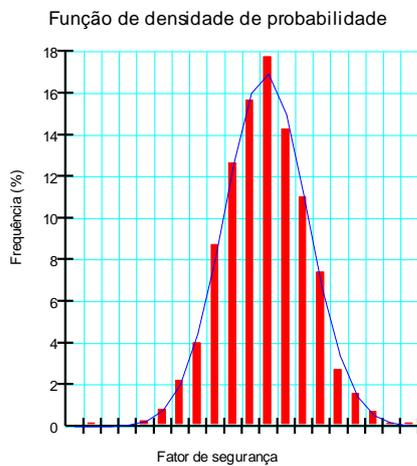
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora.

#### 4.5 Análise probabilística na presença de água

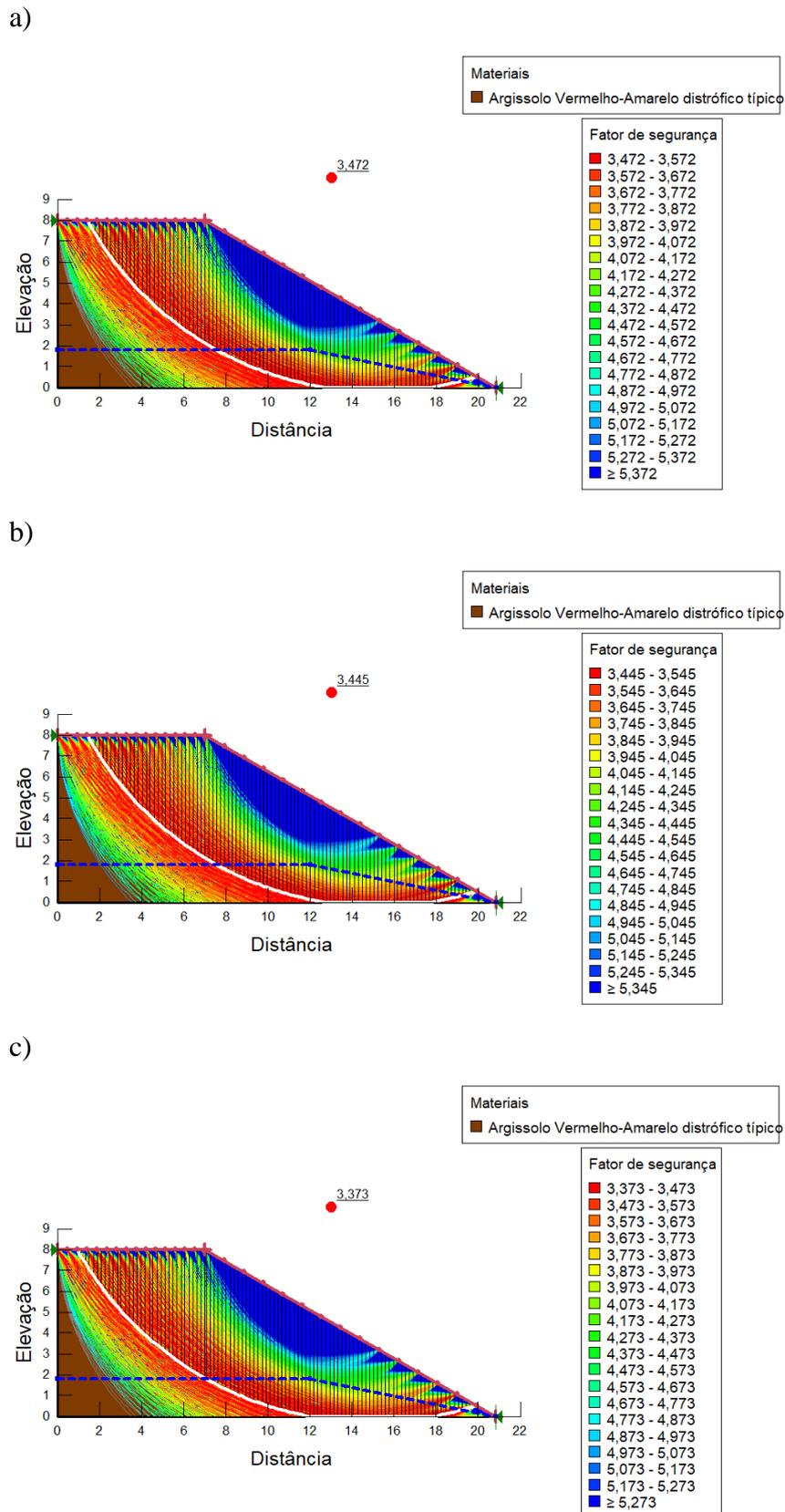
Novamente, com base nos levantamentos feitos por Teixeira (1997), inseriu-se uma linha piezométrica hipotética na profundidade de 6,2 m da crista das seções do talude em questão para verificar-se o comportamento da vertente na presença de água. Os resultados podem ser observados nas

Tabela 14- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na presença de água a 1,8 metros.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	3,472	3,445	3,373
Fator de segurança mínimo	1,1834515	1,1741833	1,158649
Fator de segurança máximo	5,7354813	5,1575112	5,0458272
Desvio padrão	0,47395453	0,47050687	0,46036972
Índice de confiabilidade	5,2262911	5,1815305	5,138097
Probabilidade de ruptura	0	0	0

Fonte: Da própria autora.

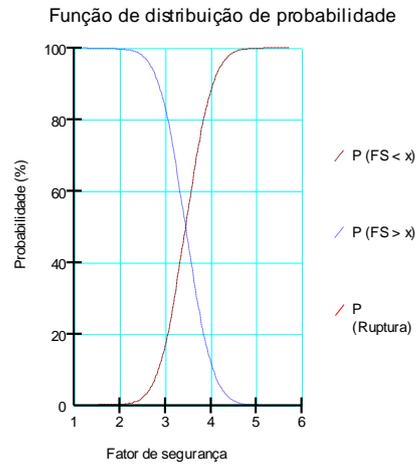
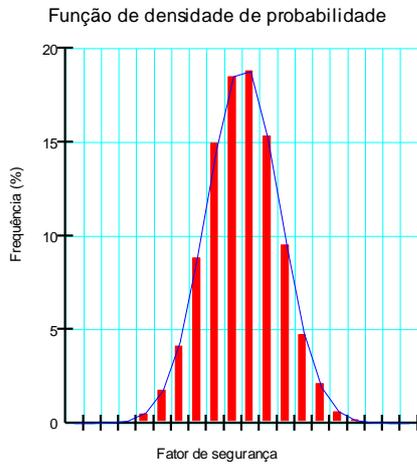
Figura 28- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na presença de água.



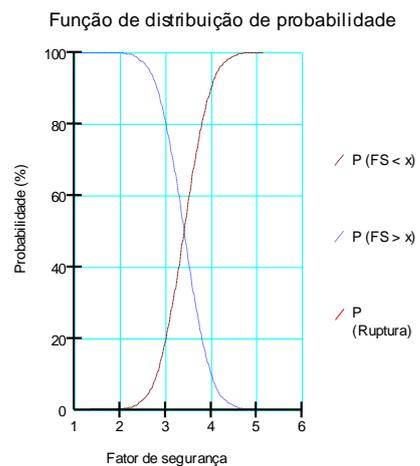
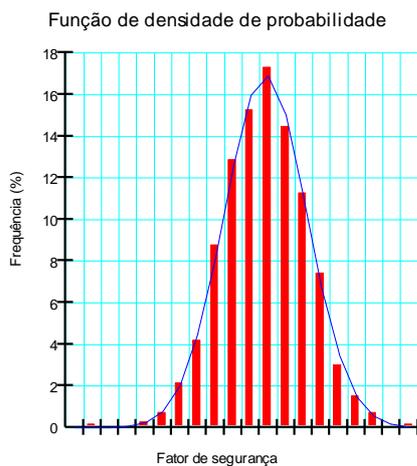
Fonte: Da própria autora.

Figura 29- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na presença de água pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

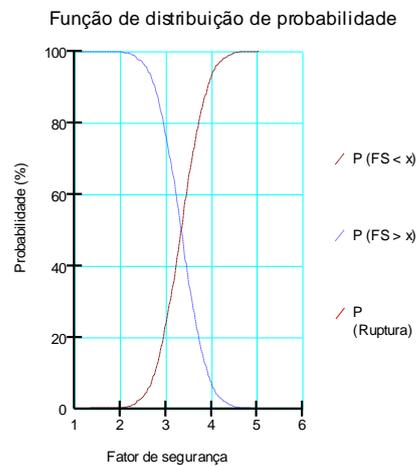
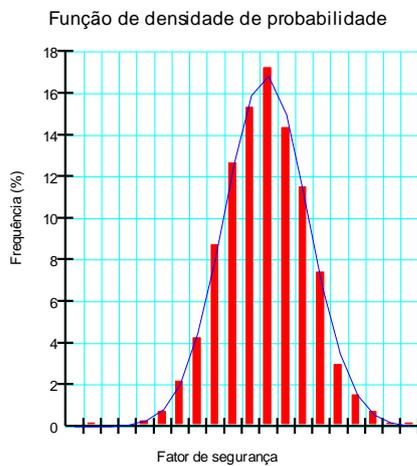
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora.

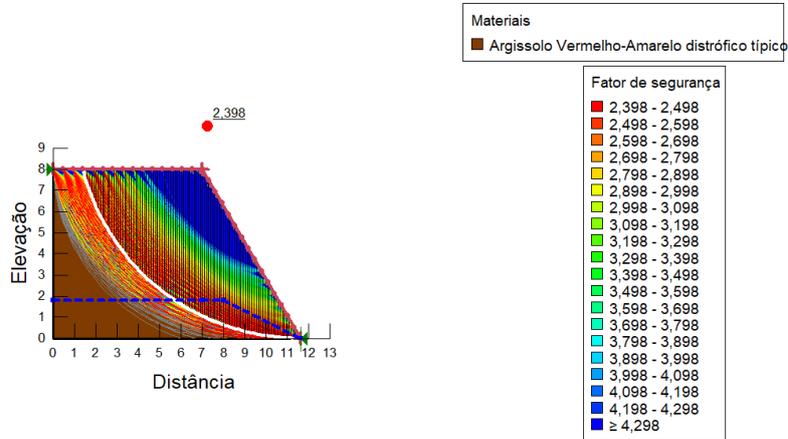
Tabela 15- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na presença de água a 1,8 metros.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	2,398	2,415	2,536
Fator de segurança mínimo	0,794746	0,81753634	0,84471662
Fator de segurança máximo	3,1807204	3,6193901	3,8192143
Desvio padrão	0,31879879	0,33096164	0,35099282
Índice de confiabilidade	4,3565138	4,2593095	4,3683004
Probabilidade de ruptura	0,0006093845	0,001	0,001

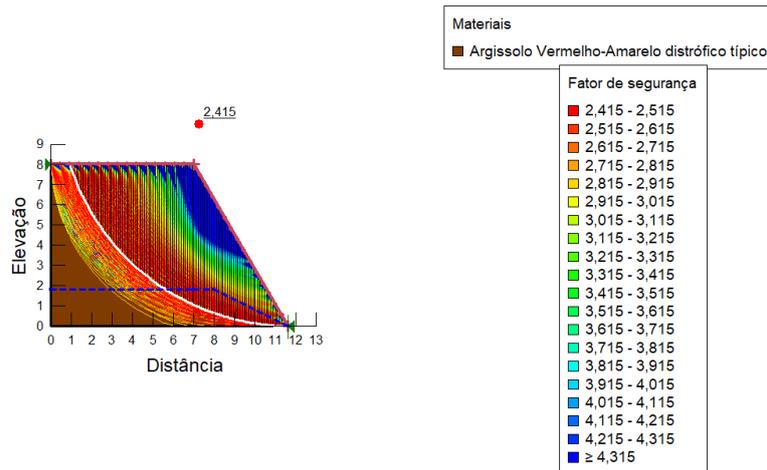
Fonte: Da própria autora.

Figura 30- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na presença de água.

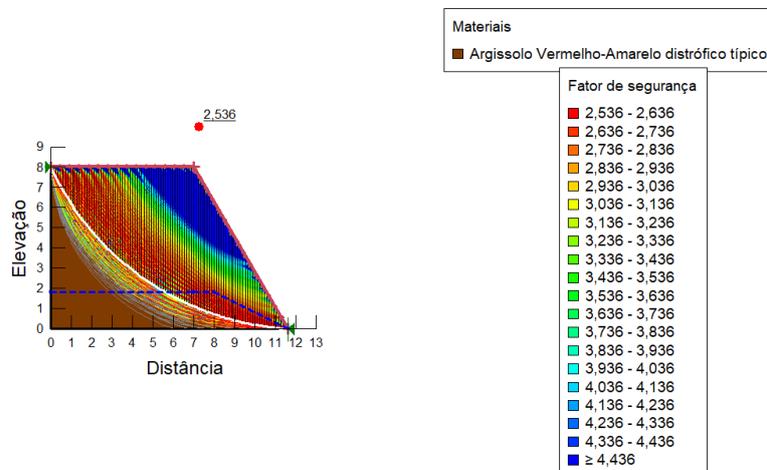
a)



b)



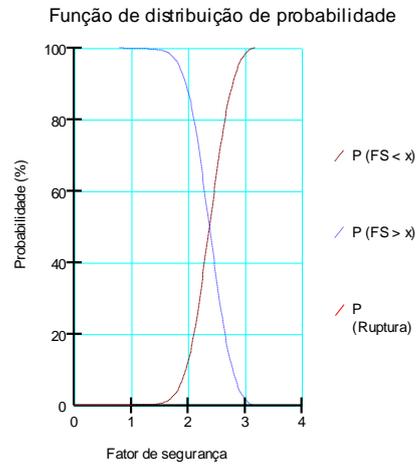
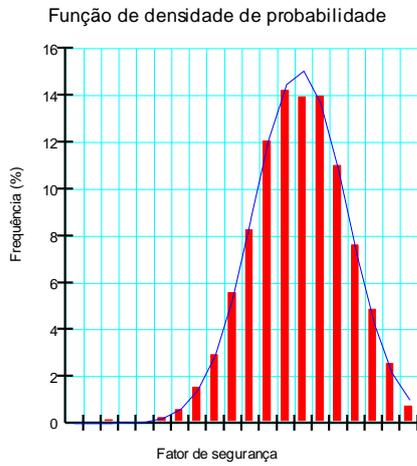
c)



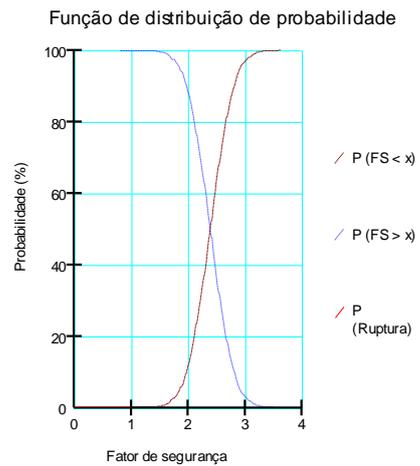
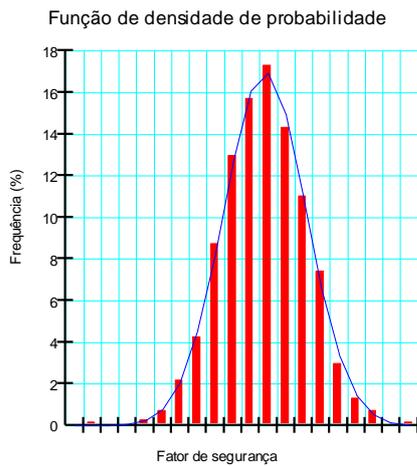
Fonte: Da própria autora.

Figura 31- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na presença de água pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

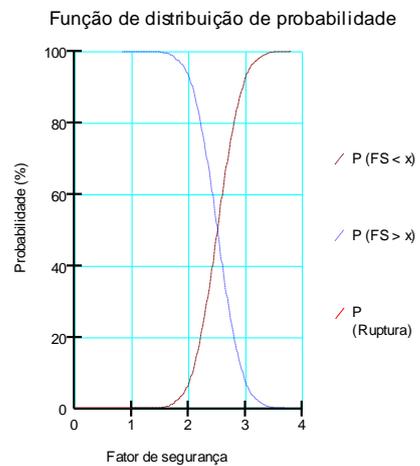
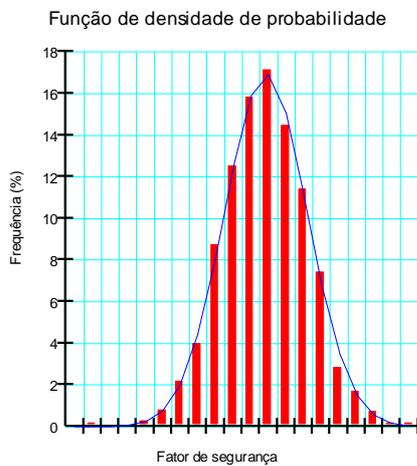
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora.

#### 4.6 Análise probabilística na condição saturada

Afim de se observar a influência do nível d'água no FS optou-se por realizar mais uma análise considerando o talude saturado, os resultados podem ser observados nas

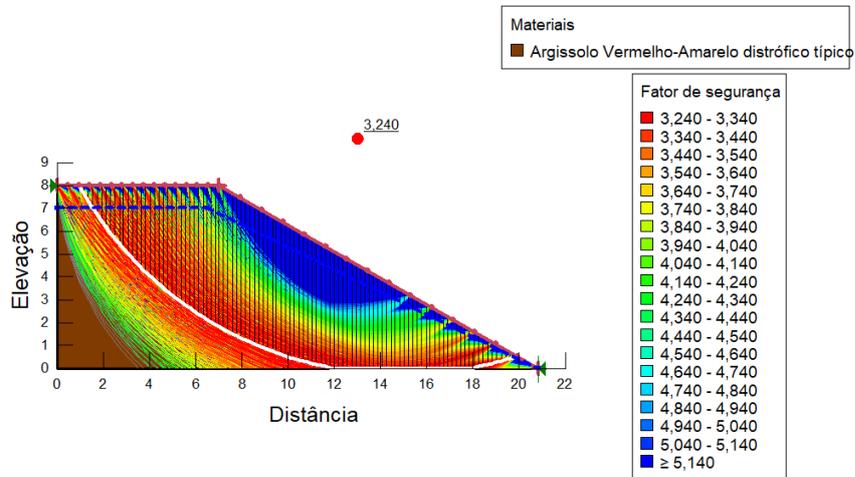
Tabela 16- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção A do talude na condição saturada.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	3,240	3,263	3,154
Fator de segurança mínimo	0,96250371	1,0021555	0,94476512
Fator de segurança máximo	5,5051499	4,9748325	4,8316948
Desvio padrão	0,47259537	0,46945196	0,46057166
Índice de confiabilidade	4,7518625	4,8057417	4,6607547
Probabilidade de ruptura	0,0002	0	0,0005

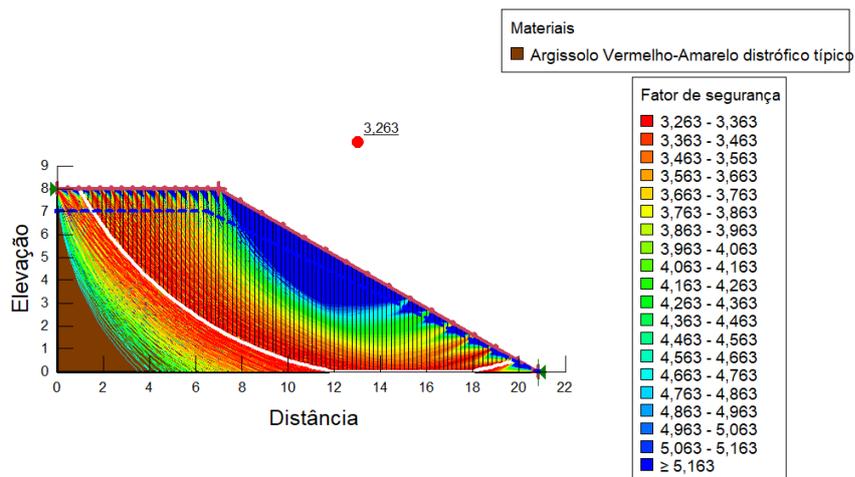
Fonte: Da própria autora.

Figura 32- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção A na condição saturada.

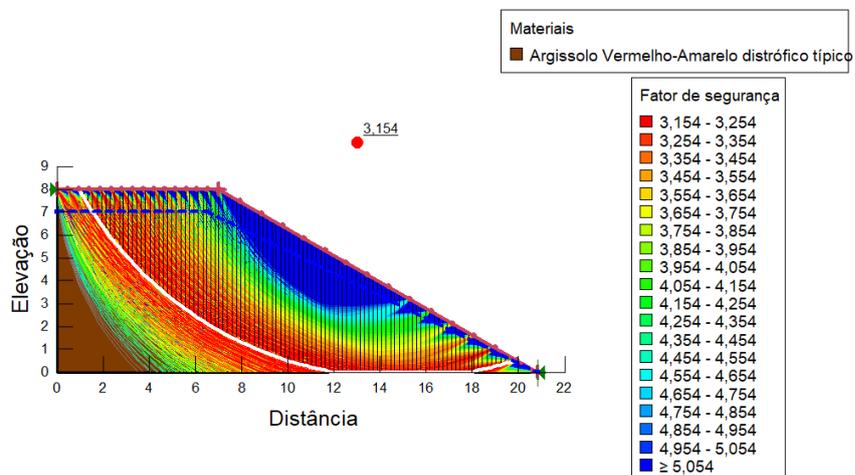
a)



b)



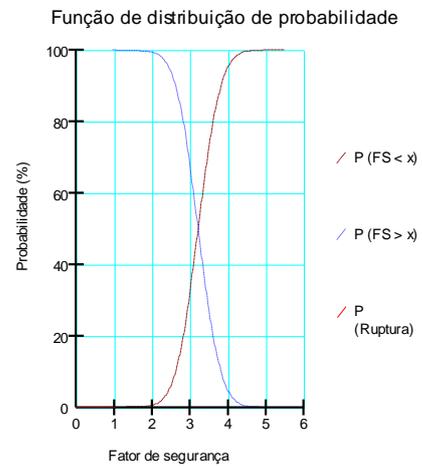
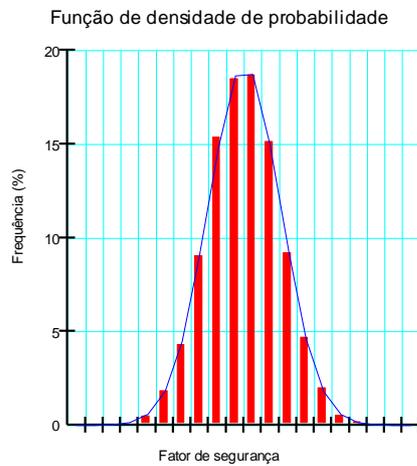
c)



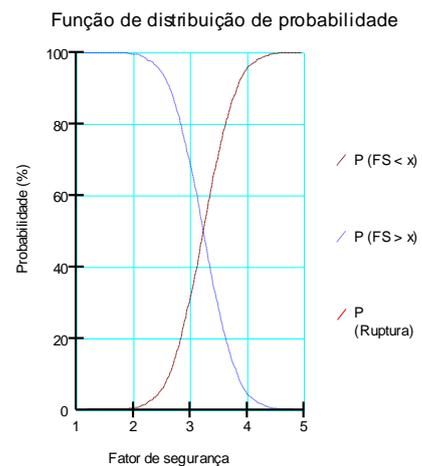
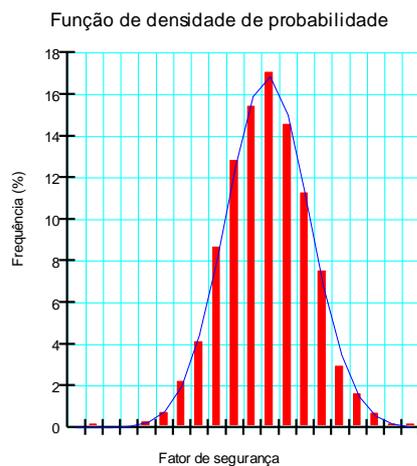
Fonte: Da própria autora.

Figura 33- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção A na condição saturada pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

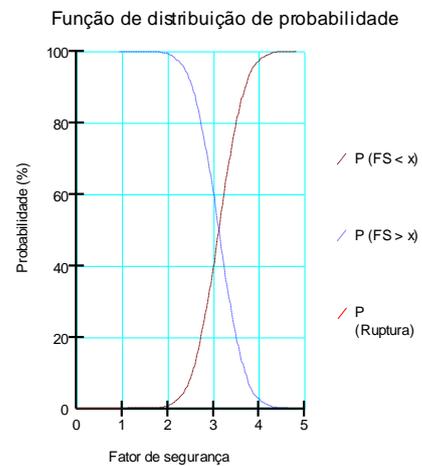
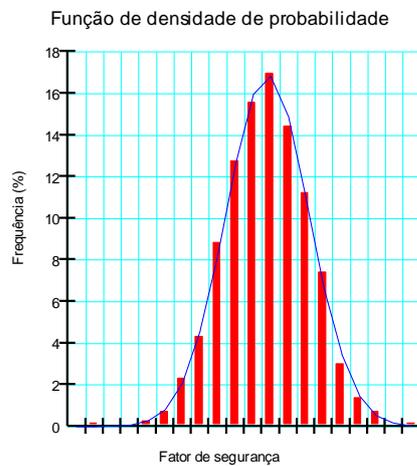
a)



b)



c)



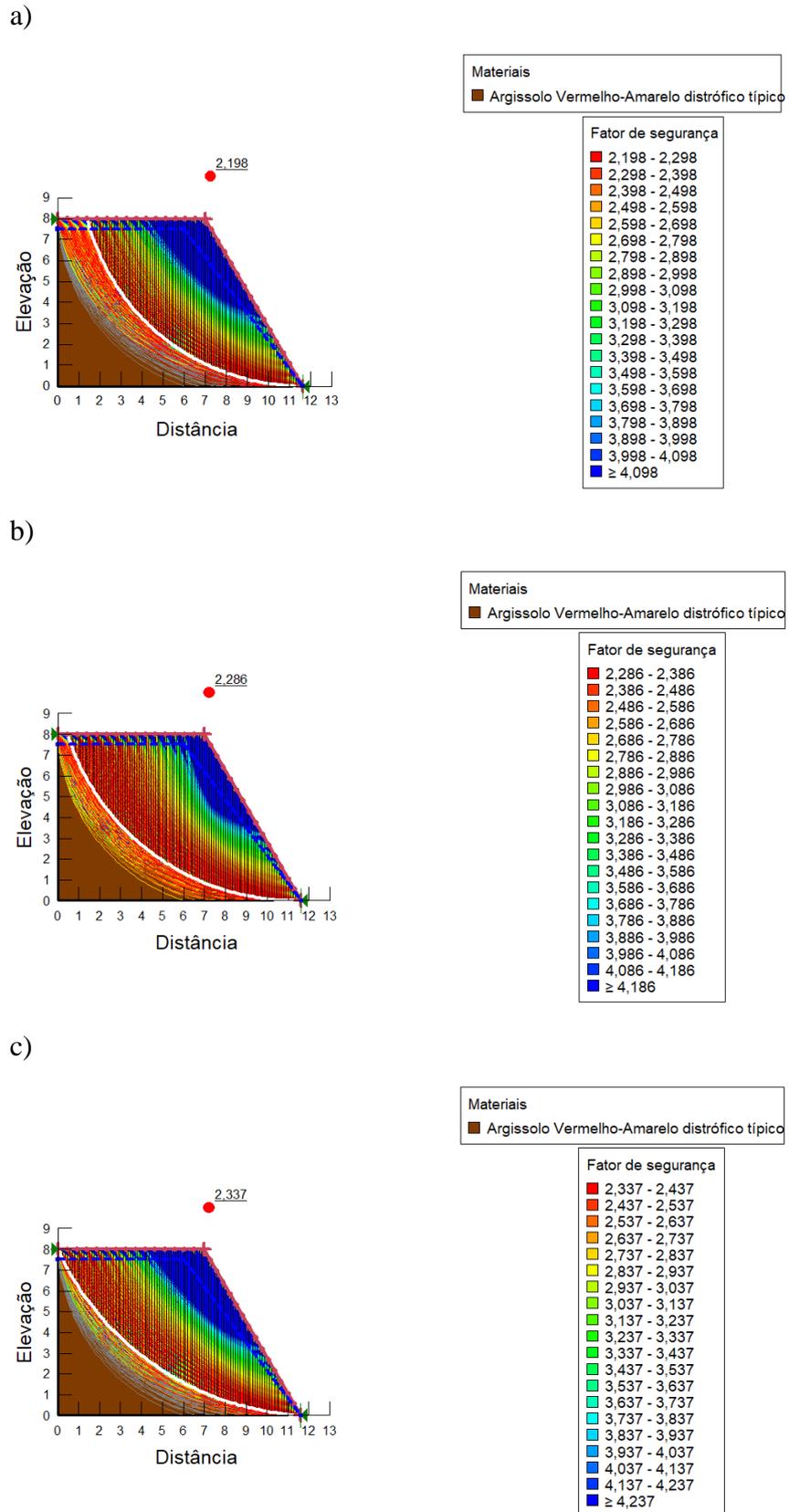
Fonte: Da própria autora.

Tabela 17- FS obtido a partir de métodos probabilísticos para a seção B do talude na condição saturada.

	<b>Bishop</b>	<b>Fellenius</b>	<b>Janbu</b>
Fator de segurança médio	2,198	2,286	2,337
Fator de segurança mínimo	0,5995963	0,69467018	0,65444688
Fator de segurança máximo	2,7584442	3,4915752	3,6251368
Desvio padrão	0,2911658	0,3305249	0,35250587
Índice de confiabilidade	3,9557124	3,8764316	3,7871654
Probabilidade de ruptura	0,0019459459	0,002	0,002

Fonte: Da própria autora.

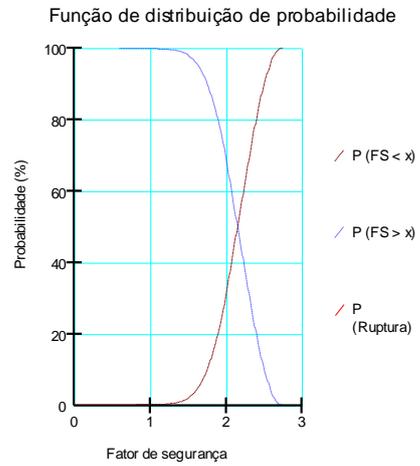
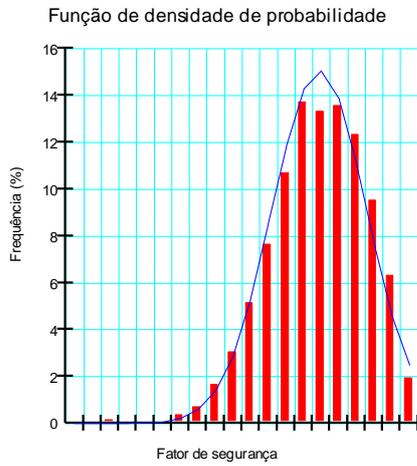
Figura 34- Superfícies potenciais de ruptura e seus FS em análise probabilística para os métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu na seção B na condição saturada.



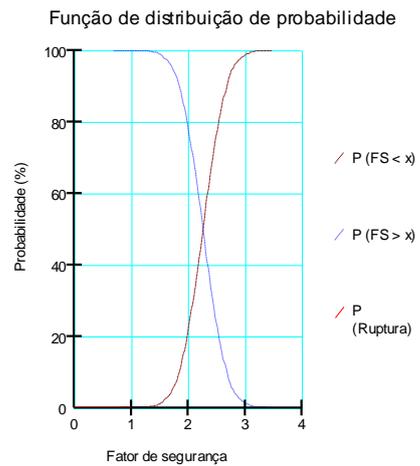
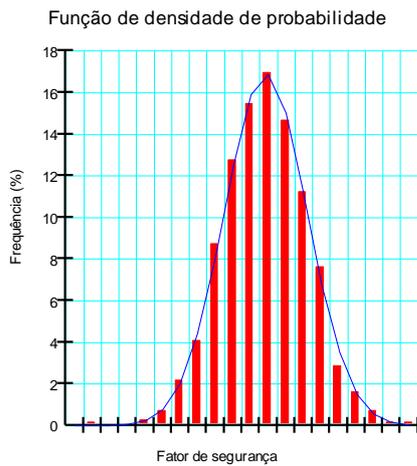
Fonte: Da própria autora.

Figura 35- Função de densidade e de distribuição de probabilidade para Seção B na condição saturada pelos métodos de a) Bishop; b) Fellenius e c) Janbu.

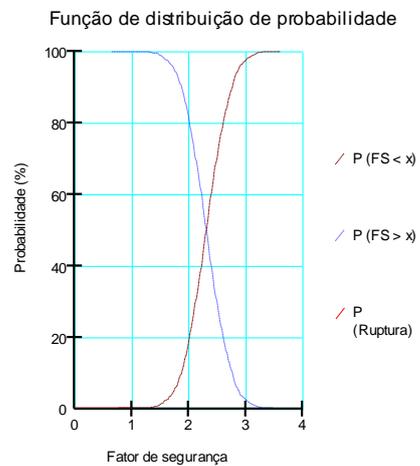
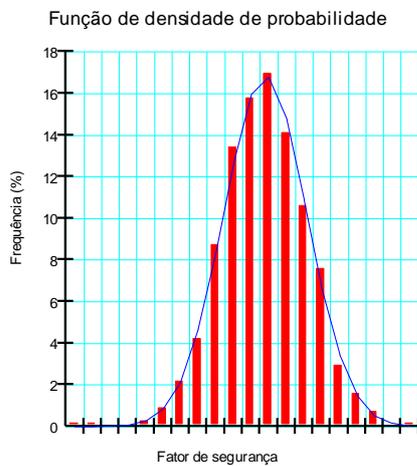
a)



b)



c)



Fonte: Da própria autora

#### 4.7 Resumo dos resultados e discussão

Tabela 18- Compilado dos resultados de FS obtidos.

		Bishop	Fellenius	Janbu	FS Médio	Varição do FS médio comparado a condição seca (%)
Determinístico Seção A	Seco	3,527	3,497	3,419	3,481	-
	Água	3,472	3,445	3,373	3,430	1,465
	Saturado	3,240	3,263	3,154	3,219	7,526
Probabilístico Seção A	Seco	3,527	3,497	3,419	3,481	-
	Água	3,472	3,445	3,373	3,430	1,465
	Saturado	3,240	3,263	3,154	3,219	7,526
Determinístico Seção B	Seco	2,419	2,432	2,548	2,466	-
	Água	2,398	2,415	2,536	2,449	0,676
	Saturado	2,198	2,286	2,337	2,274	7,812
Probabilístico Seção B	Seco	2,419	2,432	2,548	2,466	-
	Água	2,398	2,415	2,536	2,449	0,676
	Saturado	2,198	2,286	2,337	2,274	7,812

Fonte: Da própria autora.

Destaca-se o fato de as probabilidades de ruptura apresentarem valor nulo ou com valores inexpressíveis em todas as situações. Especificamente para o método probabilístico vê-se que as curvas de distribuição de frequência do fator de segurança ficaram bem distantes do fator de segurança 1, isso ocorre devido às altas médias obtidas e aos baixos desvios.

A abordagem probabilística incorporada à análise de estabilidade do talude do bairro Nilton Teixeira permitiu considerar a variabilidade dos parâmetros dos materiais, o que não ocorre em análises que consideram somente a abordagem determinística. É perceptível que os métodos probabilísticos complementam as análises determinísticas, contabilizando o grau de incerteza das variáveis, tendo como resultado final uma probabilidade de ruptura do talude, algo de grande valia para a realização de análises de risco.

Em todos os casos estudados, verificou-se que o fator de segurança médio e a probabilidade de ruína estão diretamente relacionados com os métodos de análise de estabilidade adotados.

Ficou evidente que o sistema de classificação do CPRM trabalha de forma cautelosa, uma vez que nenhuma das regiões e hipóteses estudadas foram caracterizadas como regiões de alto risco de deslizamento, tal fato também pode estar relacionado com a suposição da

vertente ser constituída de material homogêneo, e a incerteza sobre a altura do nível de água encontrado no solo.

Ao observar os valores de FS obtidos em todas as análises e comparar aos valores de FS mínimos exigidos pela NBR 11682, conforme apresentado nos Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3, ambas as seções do talude foram classificadas com baixo grau em relação ao risco a perdas de vidas humanas, como também, baixo em relação a danos materiais e ambientais.

Foi também possível verificar a influência do valor do FS pela inclinação, visto que a seção A, com menor inclinação apresentou FS's mais altos quando comparados aos da seção B. Da mesma forma, também se observou a variação do FS com a variação do nível d'água, sendo este uma das principais causas do rompimento de taludes. A condição saturada foi a que gerou o menor valor de FS, mesmo que ainda não apresente probabilidade de ruptura. Não só os resultados determinísticos obtiveram bons fatores de segurança como também os resultados probabilísticos apresentaram probabilidade de ruptura igual a zero.

Conforme o esperado, o fator de segurança obtido pela análise probabilística do Slope/W é o fator de segurança médio de todas as iterações de Monte Carlo sobre a superfície crítica obtida com um método determinístico. Por fim conclui-se que a maior vantagem do método probabilístico sobre o determinístico é a maior quantidade de dados que aquele gera, fornecendo um maior conhecimento sobre o comportamento do talude.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir das análises realizadas foi possível concluir que:

- i. A inclinação da face do talude pode reduzir o seu FS médio na condição seca em 29,15%, na presença de água em 28,67% e na condição saturada em 29,37%.
- ii. A saturação total do talude em questão pode reduzir o seu FS médio em até 7,812%.
- iii. A aplicação do método probabilístico garante uma maior quantidade de informações quando comparada aos métodos determinísticos.

### 5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Para pesquisas futuras, propõe-se a realização de investigação e caracterização do solo constituinte do talude local para diminuição das incertezas aplicadas as análises e posterior comparação de resultados.

Sugere-se também a realização das análises aqui efetivadas, com os taludes que obtiveram outras classificações pela CPRM ou em outras localidades para que de tal maneira seja possível verificar se as diferenças nos FS obtidos está relacionado com as características dos tipos de solo presente no município de Lavras ou com todos os taludes classificados como de alto risco.

## 6 REFERÊNCIAS

ALUKO, O.B.; KOOLEN, A.J.. The essential mechanics of capillary crumbling of structured agricultural soils. **Soil and Tillage Research** , Netherlands, v. 55, Jun 2000.

APAZA, M.A.F.; BARROS, J.M.C.. Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo. In: COBRAMSEG, XVII. 2014, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11.682: Estabilidade de Encostas. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**, Rio de Janeiro, 2009.

BORGATTO, A.V.A.. **ESTUDO DO EFEITO FIBRA E DA MORFOLOGIA NA ESTABILIDADE DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. Rio de Janeiro. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BRAND, E.W; PHILLIPSON, H.B. **Sampling and testing of residual soils**: a review of international practice. Hong Kong: Scorpion Press, 1985.

BRESSANI, L.A; COSTA, E.A. Avaliação probabilística da estabilidade de um talude coluvionar de basalto. In: COBRAE–CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, IV. 2005, Salvador, 2005.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, v. 3, 2015.

CHOK, Y.H. **Modelling the effects of soil variability and vegetation on the stability of natural slopes**. Austrália. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - University Of Adelaide, 2008.

CHRISTIAN, J.T. Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing?. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, ASCE, v. 130, 2004.

COSTA, E.A.. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes**. Porto Alegre. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

CRESTANI, B. **Análise probabilística do fator de segurança de taludes através do método de Monte Carlo**. Florianópolis . Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

DA SILVA, J.P.M.. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise da Estabilidade de Taludes**. Porto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, 2010.

DANTAS, A.A.A; DE CARVALHO, L.G; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, 2007.

DAS, B. M.. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 3. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

EL-RAMLY, H.M.F. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice**. Canada. Tese (PHD em Engenharia Civil) - University Of Alberta, 2002.

FERNANDES, M.O; DA SILVA FILHO, F. C. Análise de estabilidade de Taludes pelos métodos de Felenius, Bishop e Jambu. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 19, 2010.

FERREIRA, J.L.F.. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELOS MÉTODOS DE JANBU E SPENCER**. Porto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, 2012.

FRITSCHER, E. C.. **Análise de estabilidade de talude: estudo de caso no município de Teutônia/RS**. Lajeado. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari - Univates, 2016.

G1 SUL DE MINAS. **Ribeirão Vermelho transborda e provoca estragos em Lavras, MG. G1 GLOBO**. 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2015/02/ribeirao-vermelho-transborda-e-provoca-estragos-em-lavras-mg.html>. Acesso em: 30 Set. 2019.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes** . 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M.. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2013.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, Peter. **The landslide handbook: A guide to understanding landslides. Geological Survey Circular**, Reston, Virginia, U.S, 2008.

HOEK, E; BRAY, J.D. **Rock slope engineering**. 3. ed. Nova York: Institution of mining and metallurgy, 1974.

LACASSE, S; NADIM, F. Risk and reliability in geotechnical engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CASE HISTORIES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, Missouri, 1998.

LINHARES, R. M. **Análise de Estabilidade de Talude Rodoviário em Solo Residual**. Rio de Janeiro, 2011. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

LOPES, N.D; GOES, H. Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: Lavras, MG. **CPRM**, Belo horizonte, 2015.

MAIA, J.A.C; ASSIS, A.P. Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, I. 2004, Brasília: ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2004.

MASSAD, Faïçal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MOSTYN, G.R; LI, K.S. Probabilistic slope analysis-state-of-play.. In: CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING. 1993, Austrália, 1993.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

QUEIROZ, I.M. Comparação entre Análises de Estabilidade Determinística e Probabilísticas, Apresentando uma Consequente Análise de Risco. In: COBRAMSEG, XVIII. 2016, Belo Horizonte.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**, Belo horizonte, v. 26, 2002.

ROCHA, W.W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG**. Lavras. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Planta) - Universidade Federal de Lavras, 2003.

SILVA, E. **Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG)**. Lavras. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

TEIXEIRA, C.Z. **Capacidade de carga de sapatas, estacas de pequeno diâmetro e tubulões curtos em função do SPT: um estudo para a região do Sul de Minas..** São Carlos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.

TEIXEIRA, C.Z; ALBIERTO, J.H. **Capacidade de carga de sapatas, estacas de pequeno diâmetro e tubulões curtos em função do SPT: um estudo em solos residuais de gnaisses para a região Sul de Minas**. São Carlos. Tese (Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, 1997.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense**. 2009. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses.** 2. ed. Lavras, 2016.