



SANTIAGO BERTOZZI OLIVEIRA E SILVA

**ANÁLISES PROBABILÍSTICA E DETERMINÍSTICAS DA ESTABILIDADE
DE UM TALUDE NA CIDADE DE LAVRAS/MG**

**LAVRAS – MG
2020**

SANTIAGO BERTOZZI OLIVEIRA E SILVA

**ANÁLISES PROBABILÍSTICA E DETERMINÍSTICAS DA ESTABILIDADE
DE UM TALUDE NA CIDADE DE LAVRAS/MG**

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

Prof^ª. Ma. Raquel Mariano Linhares
Orientadora

**LAVRAS – MG
2020**

SANTIAGO BERTOZZI OLIVEIRA E SILVA

**ANÁLISES PROBABILÍSTICA E DETERMINÍSTICAS DA ESTABILIDADE
DE UM TALUDE NA CIDADE DE LAVRAS/MG**

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 17 de dezembro de 2020.

Prof^a. Ma. Raquel Mariano Linhares
Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Eng. Me. Mauro Vitor dos Santos Moura

UFLA
UFLA
UFRJ


Prof^a. Ma. Raquel Mariano Linhares
Orientadora

**LAVRAS – MG
2020**

*A minha Mãe Evelyni.
Ao meu Pai Paulo.
A minha Avó Alfa.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A minha Mãe Evelyni, ao meu Pai Paulo e a minha Avó Alfa, pela vida e pelos meios que me ergueram até aqui.

Agradeço a pessoa e a orientadora Raquel, por sua confiança, paciência e ajustes precisos neste trabalho.

Agradeço ainda ao professor Diogo Maciel da UFLA, pelo inestimado empréstimo de seu Drone, e ao professor Diego Hartmann da UNIPAMPA/Alegrete, pela sua exímia pilotagem.

Ao GEOTEC, pelo acolhimento e pela motivação de sempre querer buscar mais nesta área do conhecimento.

Por fim, agradeço aos amigos, que sabem quem são e o lugar que ocupam, que deram apoio e leveza nestes períodos.

A vocês, deixo minha eterna gratidão!

RESUMO

Com a necessidade de redução de riscos referentes a deslizamentos de taludes, superam-se os clássicos métodos determinísticos com a adição da probabilidade nas análises de estabilidade, contabilizando a variação dos parâmetros que eram tratados por apenas um único valor no equilíbrio limite. Retornando uma probabilidade de falha da estrutura e um índice de confiabilidade da análise, foram desenvolvidos métodos probabilísticos que complementam os fatores de segurança, sendo os métodos de Monte Carlo, de FOSM (*First Order Second Moment*) e das Estimativas Pontuais os mais estudados. Um talude com sinais de movimentação, localizado em Lavras/MG, foi objeto do estudo. Aplicando os métodos probabilísticos de Monte Carlo e de FOSM, realizaram-se comparações entre métodos de equilíbrio limite e os provindos da teoria da confiabilidade. Um modelo tridimensional do talude foi gerado por meio aerofotogrametria realizada por VANT e software específico. Foram estudadas duas seções críticas, cada uma na situação seca e saturada, e acrescentado sobrecarga de veículos na que retornou os resultados mais desfavoráveis. Encontrou-se forte divergência entre os métodos com relação a segurança da estrutura e das vidas que por ela poderiam ser atingidas, onde os métodos probabilísticos convergiram ao apontar altos riscos ($0,907\% \leq PF \leq 8,578\%$), ao contrário dos determinísticos que se tranquilizaram com altos fatores de segurança ($FS \approx 2,365$).

Palavras-chave: Estabilidade de taludes. Método probabilístico. Métodos determinísticos. Fotogrametria digital.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de movimento: a) Queda; b) Tombamento; c) Escorregamento; d) Espalhamento; e) Corridas.....	16
Figura 2.2 – Superfície de ruptura circular.....	18
Figura 2.3 – Técnica das Lamelas.....	19
Figura 2.4 – Superfície de deslizamento aproximada por uma série de elementos triangulares.....	21
Figura 2.5 – Função densidade de probabilidade.....	24
Figura 2.6 – Função de probabilidade log-normal com diferentes parâmetros μ e σ^2 . ..	25
Figura 2.7 – Representação esquemática da fotogrametria.....	29
Figura 2.8 – Tomada aérea de imagens sobrepostas.....	30
Figura 3.1 – Localização da área de estudo: a) Dentro do município de Lavras/MG, b) Detalhamento do local.....	31
Figura 3.2 – Localização da área de estudo no mapa pedológico.....	32
Figura 3.3 – Modelo tridimensional.....	32
Figura 3.4 – Medidas de referência: a) medida do portão, b) medida do passeio.....	33
Figura 3.5 – a) Curvas de nível, b) Localização das seções.....	33
Figura 3.6 – Seções críticas: a) Seção A; b) Seção B.....	34
Figura 3.7 – Nível d’água nas seções consideradas: A1, A2, B1, B2.....	36
Figura 3.8 – Possíveis considerações de sobrecarga: a) Seção A; b) Seção B.....	37
Figura 4.1 – Resultados análises determinísticas por Morgerstern-Price.....	38
Figura 4.2 – Resultados análises determinísticas por Bishop.....	39
Figura 4.3 – Resumo das análises do nível d’água em FOSM.....	43
Figura 4.4 – Influência dos parâmetros: a) Morgerstern-Price.e b) Bishop.....	44
Figura 4.5 – a) Função densidade de probabilidade e b) função de amostragem para a coesão.....	45
Figura 4.6 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Morgerstern-Price.: A1, A2, B1 e B2.....	46
Figura 4.7 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Bishop.: A1, A2, B1 e B2.....	47
Figura 4.8 – Resumo das análises do nível d’água em Monte Carlo.....	50
Figura 4.9 – Resultados análises determinísticas por Morgenstern-Price com sobrecarga na seção B.....	51

Figura 4.10 – Resultados análises determinísticas por Bishop com sobrecarga na seção B.	51
Figura 4.11 – Influência dos parâmetros para seção B com sobrecarga.....	54
Figura 4.12 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Morgenstern-Price: B1 e B2 com sobrecarga.....	55
Figura 4.13 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Bishop: B1 e B2 com sobrecarga.....	56
Figura 7.1 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção A1.....	62
Figura 7.2 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção A2.....	62
Figura 7.3 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção B1.....	63
Figura 7.4 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção B2.....	64
Figura 7.5 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção A1.....	65
Figura 7.6 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção A2.....	66
Figura 7.7 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção B1.....	66
Figura 7.8 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção B2.....	67
Figura 8.1 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Morgenstern-Price para seção B1 com sobrecarga.....	69
Figura 8.2 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Morgenstern-Price para seção B2 com sobrecarga.....	70
Figura 8.3 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Bishop para seção B1 com sobrecarga.	71
Figura 8.4 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Bishop para seção B2 com sobrecarga.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condições dos Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade.....	20
Tabela 2.2 – Fatores de segurança mínimos no equilíbrio limite.....	21
Tabela 2.3 – Valores típicos do coeficiente de variação dos principais parâmetros geotécnicos.	23
Tabela 2.4 – Índice de confiabilidade e probabilidade de falha admissível.	28
Tabela 3.1 – Dados dos solos de Lavras.....	35
Tabela 3.2 – Dados dos parâmetros.....	35
Tabela 4.1 – Resultados determinísticos.	40
Tabela 4.2 – Variação de cada parâmetro.....	40
Tabela 4.3 – Interações.....	41
Tabela 4.4 – FS das interações em Morgenstern-Price.	41
Tabela 4.5 – FS das interações em Bishop.	41
Tabela 4.6 – Sequência de cálculo de V(FS) por Morgenstern-Price.	41
Tabela 4.7 – Sequência de cálculo de V(FS) por Bishop.	42
Tabela 4.8 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade para Morgenstern-Price.	42
Tabela 4.9 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade para Bishop.	42
Tabela 4.10 – Resultado de Monte Carlo para Morgenstern-Price.	48
Tabela 4.11 – Resultado de Monte Carlo para Bishop.	48
Tabela 4.12 – Comparação da PF e β entre os métodos probabilísticos por Morgenstern-Price.	49
Tabela 4.13 – Comparação da PF e β entre os métodos probabilísticos por Bishop.....	49
Tabela 4.14 – Resultados determinísticos da seção B com sobrecarga.....	52
Tabela 4.15 – Fator de segurança das iterações por Morgenstern-Price para seção B com sobrecarga.....	52
Tabela 4.16 – Fator de segurança das iterações por Bishop para seção B com sobrecarga.	53
Tabela 4.17 – Sequência de cálculo de V[FS] por Morgenstern-Price com sobrecarga.	53
Tabela 4.18 – Sequência de cálculo de V[FS] por Bishop com sobrecarga.....	53
Tabela 4.19 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade por Morgenstern-Price com sobrecarga.....	54

Tabela 4.20 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade por Bishop com sobrecarga.	54
Tabela 4.21 – Resultados de Monte Carlo por Morgenstern-Price com sobrecarga.	56
Tabela 4.21 – Resultados de Monte Carlo por Bishop com sobrecarga.....	56

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FS Fator de segurança

PF Probabilidade de falha

MP Morgenstern-Price

CoV Coeficiente de variação

FOSM *First Order Second Moment* (Primeira Ordem e Segundo Momento)

VANT Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTAS DE SÍMBOLOS

β Índice de confiabilidade

\varnothing Ângulo de atrito

c Coesão

γ Peso específico

τ Resistência ao cisalhamento

σ Tensões totais

σ' Tensões efetivas

u Poropressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.	Estabilidade de Taludes.....	16
2.2.	Métodos Determinísticos.....	22
2.3.	Métodos Probabilístico.....	22
2.4.	Fotogrametria Digital	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1.	Levantamento topográfico e modelo tridimensional.....	31
3.2.	Curvas de nível e seções críticas	33
3.3.	Parâmetros de resistência utilizados e suas variabilidades.....	34
3.4.	Análises determinísticas e probabilísticas.....	35
4	RESULTADOS	38
4.1.	Análises determinística	38
4.2.	Análise por FOSM	40
4.3.	Análise de Monte Carlo.....	44
4.4.	Análises com sobrecarga.....	50
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXO 1.....	62
	ANEXO 2.....	69

1 INTRODUÇÃO

O alto número de regiões de expansão urbana onde o terreno se encontra em depressões consideráveis, como o caso da cidade de Lavras/MG, torna o diagnóstico de taludes de terra uma das atividades mais realizadas dentro da geotecnia. Além disso, locais mais acidentados com presença de encostas tendem a se tornarem mais baratos, propensos a ocupações pela população mais carente, tendo em vista o salário médio abaixo do mínimo entre a metade mais pobre da população segundo o PENAD (2019). Isso torna o impacto de um possível deslizamento devastador e a necessidade de redução dos riscos imperativa.

Os taludes são estruturas inclinadas constituídas de solos e/ou rochas, materiais de construção heterogêneos que, em quase sua totalidade, ainda são analisados pelos métodos determinísticos. Baseados na teoria do equilíbrio limite, esses métodos consideram valores fixos das variáveis do problema (como os parâmetros de resistência dos materiais), em um cálculo comparativo entre esforços atuantes e resistentes, sendo a razão entre eles denominada de fator de segurança (FS). Regulamentado pela NBR 11.682 (ABNT, 2009) – Estabilidade de Encostas, e amplamente aceito na literatura, o FS é um único número que tem a responsabilidade de representar a estabilidade de todo um sistema de grande complexidade, se afastando da realidade.

Buscando verificações mais compatíveis com a alta heterogeneidade do solo, inerente a materiais de origem natural, os métodos probabilísticos foram desenvolvidos a fim de incorporar ao estudo de taludes as probabilidades de variação dos seus parâmetros. A teoria da confiabilidade forma a gênese destas metodologias que, como dito por Giacon Junior (2018), buscam dar uma melhor distribuição das variáveis. Com isto, Abramson *et al.* (2001) sublinham dois grupos principais para estudo: os baseados em transformações e os baseados em simulações. Ao contrário dos métodos determinísticos, que geram o FS, os probabilísticos concebem uma distribuição de densidade das probabilidades, que no final indicam a probabilidade de falha (PF) e o índice de confiabilidade (β). Por conta disso, os métodos probabilísticos se encontram como um modo mais completo de análise, pois consideram as incertezas.

A partir disso, vários estudos vêm sendo realizados com aplicações em casos reais, confirmando sua superioridade ao modelo determinístico que apenas considera números fixos.

Neste trabalho, foi feita a análise e comparação destas diferentes metodologias em um talude de alta circulação de veículos em sua crista, na cidade de Lavras/MG, que apresentava sinais de movimentação.

Para tal, foi realizado o levantamento do talude por meio da técnica de fotogrametria digital utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT), obtendo informações topográficas. A geometria do talude e os intervalos dos parâmetros de resistência foram inseridos em um software computacional de equilíbrio limite desenvolvido especificamente para geotecnia, onde a sua estabilidade foi calculada por diferentes métodos.

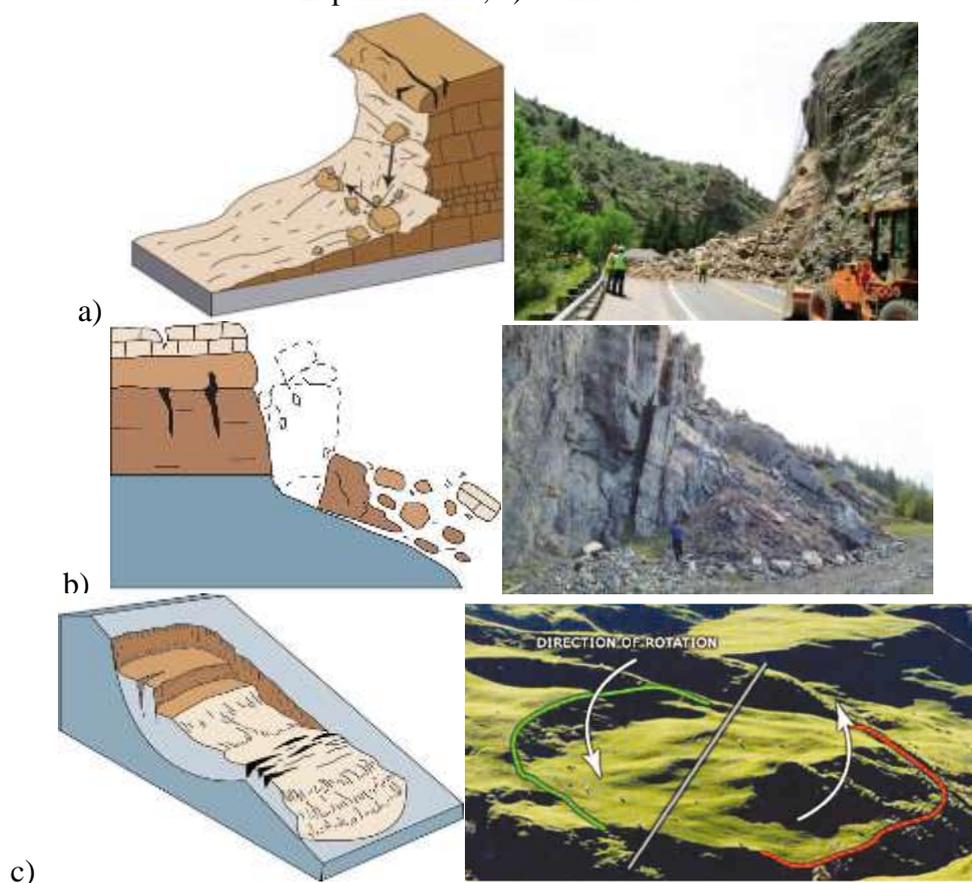
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

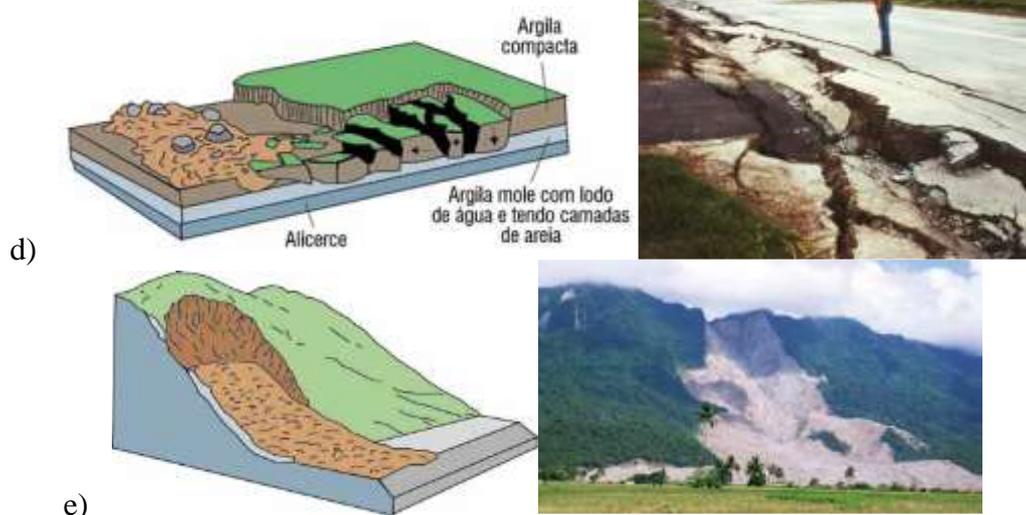
2.1. Estabilidade de Taludes

Tendo em mente a integridade dos taludes, sejam construídos pelo homem ou naturais, criou-se a necessidade de verificar possíveis movimentos da massa do solo que, como diz Gerscovich (2012), se associam a inconvenientes instabilidades das estruturas. Para Silva, B (2019), as movimentações são provenientes de características típicas diferentes, mas são passíveis de classificações, permitindo o desenvolvimento de métodos de análises. Sendo assim, vários autores trabalharam em modos de classificações (VARNES, 1958, 1978; CRUDEN E VARNES, 1996; GUIDICINI E NIEBLE, 1983; HUTCHINSON, 1968). De acordo com Silva, B (2019), o método de Varnes (1978) é o de maior utilização mundial.

Varnes (1978) relaciona a qualidade do material envolvido com o tipo de movimentação sofrido por ele, denominados: quedas, tombamentos, escorregamentos, espalhamentos, corridas e movimentos complexos (Figura 2.1). Os escorregamentos são divididos em rotacional e translacional. Já os materiais são divididos em solos e rochas, podendo o solo ser grosseiro ou fino.

Figura 2.1 – Tipos de movimento: a) Queda; b) Tombamento; c) Escorregamento; d) Espalhamento; e) Corridas.





Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

A consideração teórica feita para a estabilidade de taludes é dita por Silveira *et al.* (2012) como o equilíbrio entre três grupos de forças, sendo elas o peso do material, o fluxo de água e a resistência ao cisalhamento do maciço, em que os dois primeiros são de tendência ao movimento e o último a favor da estabilidade. Assumindo esta afirmação, torna-se primordial o conhecimento do tipo de solo, uma vez que os parâmetros associados ao material definem a resistência cisalhante; são eles, principalmente, o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c), principais moldadores da resistência de um solo. O impedimento de cisalhar existe, em grande parte, devido ao atrito entre suas partículas e a máxima angulação que se pode chegar sem a sua movimentação é o parâmetro ângulo de atrito. Solos finos, principalmente os de forma lamelar (argilas), sofrem com interação físico-química entre suas partículas, uma atração, que contribui para a resistência cisalhante, nomeada coesão. Coulomb propõe a equação [2.1], relacionando ambos os parâmetros, como forma de quantificação da resistência ao cisalhamento (τ). Além da resistência, outros parâmetros interferem na estabilidade de taludes, como as tensões totais (σ) e a poro pressão (u), resultando no cálculo da tensão efetiva (σ').

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad [2.1]$$

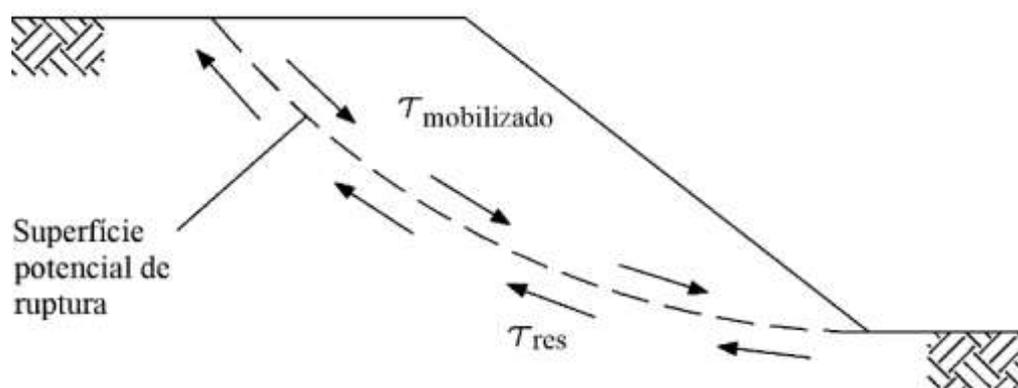
Com sua definição corroborada por Fiori (2015), o fator de segurança (FS) sintetiza a relação de equilíbrio, sendo a razão dos esforços de ação resistente pelas favoráveis ao desprendimento (EQUAÇÃO [2.2]). Quando se tem então um FS igual a 1, o talude encontra-se na iminência de ruptura; um FS acima de 1 oferece uma margem de

segurança. Na prática, não existe FS menor do que 1, pois isso significaria que o talude já rompera. Isso descrito, conforma a teoria do equilíbrio limite, que fundamenta vários métodos desenvolvidos ao longo do tempo.

$$FS = \frac{\text{Esforços Resistentes}}{\text{Esforços Solicitantes}} \quad [2.2]$$

Instabilidade gera movimentação de uma parte da massa de solo, que escorrega por uma determinada superfície, a de ruptura. Análises de estabilidade são realizadas a partir da definição desta superfície. Seu delineamento ocorre no traçado com menor FS encontrado dentre outras superfícies potenciais, ocorrendo em formas variadas, como: plano-circular, circular e de tipo cunha. Em Zanardo (2014), citando Guidicini; Nieble, (1983), encontra-se o tipo circular (Figura 2.2) como o mais próximo a realidade entre os solos coesos.

Figura 2.2 – Superfície de ruptura circular.

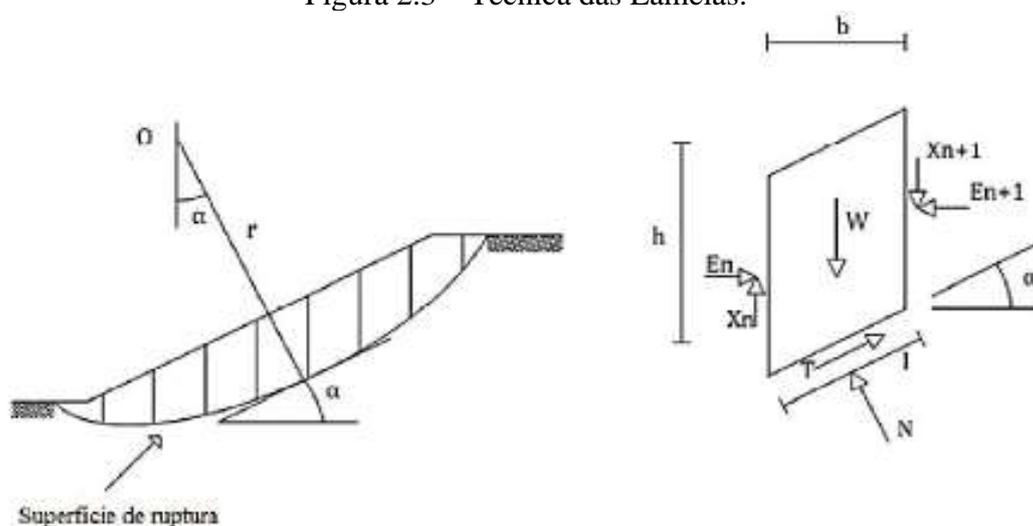


Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016).

A teoria do equilíbrio limite assume hipóteses importantes de se levantar. É considerado o modelo rígido plástico como comportamento do solo, admitindo-se rompimento brusco sem antes formar sinais de deformações. Esta limitação resulta no fato de que os métodos não fornecem informações acerca da magnitude das tensões dentro do talude e nem a variação ao longo da superfície de ruptura. Outra hipótese é a impossibilidade de assumir ruptura progressiva, uma vez que se admite deslizamento em todos os pontos da superfície de ruptura ao mesmo tempo, o que não é muito razoável, sendo o processo dinâmico, em que alguns pontos iniciam o processo e, com a deformação, outros pontos também se plastificam, até a total ruptura ocorrer (DUNCAN, 1996).

Fellenius em 1927 foi o primeiro a sugerir um método de resolução, criando a técnica das lamelas, que divide o maciço acima da superfície de ruptura em fatias e realiza a verificação em cada unidade (Figura 2.3). Considerando o equilíbrio entre as forças horizontais, verticais e o momento, o sistema gerado possui mais incógnitas do que equações, tornando a principal tarefa do autor a simplificação do sistema, a fim de possibilitar um problema solucionável. Silva, M. (2019) assume a divisão dos métodos em dois grupos, denominados de rigorosos e simplificados, onde os rigorosos consideram os equilíbrios de forças e momento de uma só vez, ao contrário dos simplificados, que não satisfaz todas as equações de equilíbrio. Ademais, os métodos foram desenvolvidos para configurações específicas de superfícies críticas, sendo a superfície circular o tipo mais comum. Ao todo, cada novo método criado tem sua forma particular de simplificação.

Figura 2.3 – Técnica das Lamelas.



Fonte: Freitas (2011).

Alguns dos principais métodos encontrados na literatura são: Fellenius, Bishop, Morgenstern e Price, Spencer e Janbu. As principais hipóteses são moldadas pela consideração de forças entre fatias. Suas características e as principais diferenças entre os métodos apontados são resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Condições dos Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade.

Método	Equilíbrio de momentos	Equilíbrio de forças horizontais	Força de interação normal (E)	Forças de interação Tangenciais	Inclinação da resultante X/E
Fellenius	Sim	Não	Não	Não	Não existe
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Jambu	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern e Price	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Fonte: adaptado de Freitas (2011).

Na Tabela 2.1, Freitas (2011) expôs a versão simplificada do método de Bishop que, utilizado no trabalho de Vecci (2018), trouxe resultados mais próximos aos métodos rigorosos do que o método de Fellenius. Silva, M (2019) ressalta que o método de Morgenstern e Price é um método rigoroso e o mais utilizado, atende todas as condições de equilíbrio e de fronteira, e ainda pode ser utilizado com diferentes formas de superfície de ruptura.

O resultado de um fator de segurança, quando obtido, deve passar por uma análise de riscos, averiguando a sua satisfatoriedade quanto as possíveis percas humanas e materiais. A NBR 11.682 (ABNT, 2009) – Estabilidade de Encostas, admite que o FS obtido pelos cálculos não é realmente o existente na estrutura, devido a imprecisão das hipóteses e incertezas dos parâmetros do solo adotado. Deste modo, a norma especifica acréscimos mínimos de segurança nos fatores, a depender da avaliação de risco do local, sendo de 15% para áreas de baixo risco, 30% para as de risco médio e de 50% para locais de alto risco. Quando se tem proximidade imediata de edificações habitacionais, a NBR impões a classificação de alto risco. Quando houver distância, entre o talude e o local a ser afetado, com espaço de utilização não permanente, esta poderá ser considerada de médio risco. O baixo risco pode ser atribuído em locais que estejam instituídos procedimentos capazes de prevenir acidentes em rodovias, tuneis em escavação, minas, bacias de acumulação de barragens e canteiros de obra em geral. A Tabela 2.2 – Fatores de segurança mínimos no equilíbrio limite. resume os FS mínimos para cada situação.

Tabela 2.2 – Fatores de segurança mínimos no equilíbrio limite.

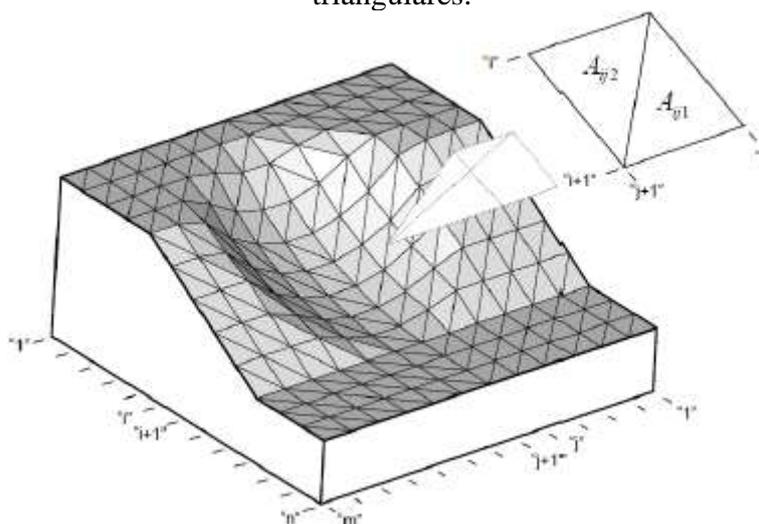
Grau de segurança necessário ao local	Métodos baseados no equilíbrio limite
	Fator de segurança mínimo
Alto	1,50
Médio	1,30
Baixo	1,15

Fonte: Adaptado da NBR 11.682 (ABNT, 2009).

Como uma grande ferramenta aos geotécnicos, houve o advento do método dos elementos finitos e sua aplicação na análise de taludes, permitindo resoluções por análises de tensão-deformação, aproximando-se mais a realidade que o modelo rígido plástico. É uma ferramenta numérica que traz aproximações para equações diferenciais ordinárias sem solução analítica constituída. Ela permite a resolução computacional de problemas de contorno, uma vez que pode ser toda transformada em algoritmos, e tem como base a análise de uma região (domínio), de características geométricas, constitutivas e resistentes conhecidas, bem como o campo de tensões e deslocamentos para certas solicitações e condições de fronteira submetido ao material. O domínio é discretizado e composto por vários elementos finitos com ligações (nós) (Figura 2.4), sendo a matriz de rigidez (K), relacionada a tensão, deformação e geometria do elemento, e o vetor de solicitações (P) arranjados de acordo com a equação [2.3], onde Φ é o vetor de deslocamento nodal. (JESUS, 2015)

$$[K]\{\Phi\} = \{P\} \quad [2.3]$$

Figura 2.4 – Superfície de deslizamento aproximada por uma série de elementos triangulares.



Fonte: Soares (2010).

As melhorias trazidas com o método também vêm acompanhadas de alguns pesares, como o necessário conhecimento de um maior número de parâmetros e o grande

processamento computacional requerente. Assim, o método dos elementos finitos não está difundido por completo e a metodologia do equilíbrio limite ainda é muito utilizada e aceita, uma vez que é uma ferramenta útil para análises de segurança.

2.2. Métodos Determinísticos

A heterogeneidade do solo e de suas camadas estratigráficas levam a uma variabilidade de seus parâmetros e, conseqüentemente, a um FS diferente ao longo de sua possível superfície de ruptura. Mas, como Cheng e Lau (2014) lembram, a maioria das análises são simplificadas a um único FS para toda a superfície, assim, desconsiderando a ruptura progressiva já descrita por Duncan (1996). Ainda, segundo Gerscovich (2016), todos os pontos ao longo da superfície imaginada são tidos ao mesmo tempo com $FS = 1$ no momento de falha. Isso dialoga com a afirmação de Vecci (2018), de que todos os métodos apresentados (Tabela 2.1) consideram as hipóteses de um único FS, bem como de uma superfície de ruptura bem definida e da generalização do critério de ruptura de Mohr-Coulomb para toda ela. Esse modelo de valores únicos para a representação do todo é chamado método determinístico, onde a segurança se torna toda dependente dos dados escolhidos e da geometria assumida da superfície de ruptura.

São modelos amplamente aceitos e presentes na prática geotécnica desde as décadas passadas, mas que começam a serem vistas com mais crítica a partir da incorporação dos métodos probabilísticos nas análises de estabilidade.

2.3. Métodos Probabilístico

Incertezas são intrínsecas à engenharia e aumentam sua dimensão dentro da área geotécnica, onde seus materiais de uso estão fora de qualquer controle industrial. Einstein e Baecher (1982) admitem a impossibilidade de extinção das incertezas, mas afirmam que devem ser enfrentadas e colocam como a principal questão o modo de fazê-lo. Neste contexto, a teoria da confiabilidade surge como uma ferramenta de consideração dessas incertezas, onde se pode fazer uso de conceitos básicos em métodos sem grandes complexidades, como apontado por Vecci (2018), e com isso não exigem do engenheiro um profundo conhecimento em sofisticadas teorias probabilísticas. Assim, as incertezas que vinham sendo absorvidas através do conservadorismo, ganham um modo mais eficiente através da probabilidade.

Silva (2015), baseado em Griffiths (2007), explica sobre as incertezas. Elas podem ser divididas em dois grupos, as denominadas aleatórias e as sistêmicas. As aleatórias são as propriedades incertas do solo, como exemplo, a variação espacial dos

parâmetros dentro de uma mesma camada estratigráfica, fruto da heterogeneidade dentro da própria camada. Já as incertezas sistêmicas vêm do conhecimento deficiente das variáveis através da desconfiança em ensaios e medições ou pelo número reduzido destes, os quais podem não ter boa representatividade. Ressalta ainda que, as de cunho sistêmico, com a utilização de equipamentos e técnicas melhores ou com mão de obra mais qualificada, podem ser eliminadas ou pelo menos reduzidas, ao contrário das aleatórias. As variáveis aleatórias são representadas por meio de sua distribuição de probabilidade, com média e desvio padrão, gerados através do tratamento estatístico de dados de medições. Na falta de uma quantidade suficiente de ensaios, Assis *et al.* (2012) oferecem intervalos típicos de valores de coeficientes de variação que podem ser utilizados. (Tabela 2.3). Com valores de coeficientes de variação encontrado na literatura, Crestani (2018) propala o ângulo de atrito como o parâmetro mais influente. Giacon Junior (2018) obteve em seus resultados uma minoração do valor de coesão em função da saturação.

Tabela 2.3 – Valores típicos do coeficiente de variação dos principais parâmetros geotécnicos.

Parâmetro	Coeficiente de Variação (%)
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo efetivo de resistência	10 (04 a 20)
Coesão não-drenada	30 (20 a 50)

Fonte: adaptado de Assis *et al.* (2012).

Seguem algumas definições com o auxílio de Vecci (2018). Espaço amostral caracteriza um conjunto com todos os possíveis resultados de um experimento. Média (μ) é um valor de tendência central, obtida a partir da divisão da soma das observações por sua quantidade, firmada como primeiro momento para se encontrar uma função distributiva de probabilidade.

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad [2.4]$$

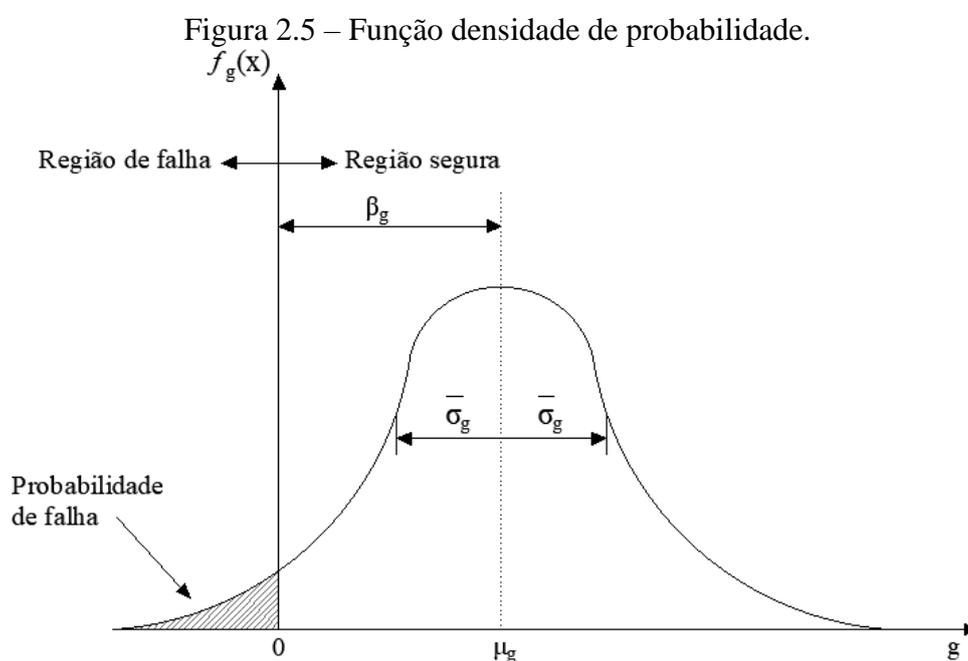
Como segundo momento, a variância (σ^2) surge a partir da média da amostra, tendo como objetivo avaliar a dispersão em torno da medida central.

$$V[X] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx \quad [2.5]$$

O desvio padrão (σ) vem da raiz quadrada da variância, com altos valores indicando altas dispersões, sendo o oposto verdadeiro. Outros momentos para definição

do comportamento da função de densidade probabilística são existentes, porém os métodos de análises aplicados a verificação de estabilidade de taludes utilizam apenas dos primeiro e segundo apresentados. Afinal, a função da densidade de probabilidade é a determinadora da distribuição da probabilidade de ocorrência dos valores para uma variável aleatória.

A utilização da distribuição probabilística é uma estratégia inteligente de suprir a necessidade de grandes quantidades de dados de parâmetros. Sendo assim, os dados podem assumir satisfatoriamente uma distribuição paramétrica, onde a distribuição normal (Figura 2.5) é a mais presente nas análises e se mostra bem ajustável, destacada por Silva, B (2019) como boa solução e de utilização versátil e fácil.



Fonte: adaptado de Morales (2014).

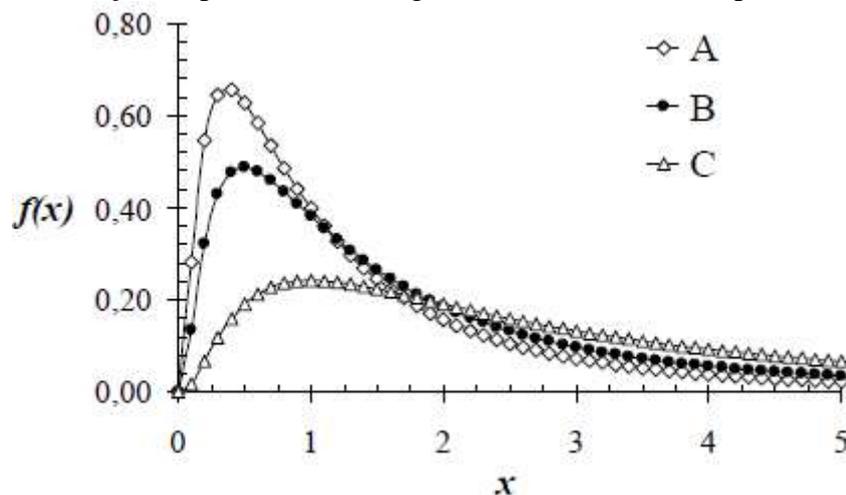
Reproduzida no trabalho de Silva, D (2019), a equação [2.6] representa a forma da função de distribuição normal de uma dada variável aleatória X , com média μ e desvio padrão σ .

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad [2.6]$$

Essa distribuição permite a existência de valores negativos, uma desvantagem. Contornando matematicamente, ajustando uma distribuição não negativa aos dados, tem-se a distribuição lognormal, que surge da anterior, onde o logaritmo natural da variável que irá assumir a distribuição normal, com a expressão [2.7]. Esta pode ser vislumbrada na figura 2.6.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln X}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln X}}{\sigma_{\ln X}}\right)^2\right] \quad [2.7]$$

Figura 2.6 – Função de probabilidade log-normal com diferentes parâmetros μ e σ^2 .



Fonte: Silva (2015).

Como principais resultados das análises probabilísticas, se encontram a probabilidade de falha (PF) e o índice de confiabilidade (β). Visto que o deslizamento ocorre quando se atinge FS menor que 1, temos então que a PF é a porcentagem de análises de FS que atingem esta condição, correspondendo a área abaixo da curva de distribuição entre $-\infty$ a FS = 1. Já o coeficiente β é um desvio medido a partir da média do FS até o valor crítico. Assim esses dois valores se relacionam de forma inversamente proporcional e são ilustrados na Figura 2.5.

Monte Carlo (MC), *First Order Second Moment* (FOSM – do inglês Primeira Ordem, Segundo Momento), e as Estimativas Pontuais (EP), são os métodos probabilísticos de maior utilização e conformam complemento imprescindível às análises determinísticas, fornecendo a PF e o β (SILVA, 2015).

O método MC utiliza geração de conjuntos de amostras aleatórios por meio de geradores de números aleatórios. Obtêm-se um FS de cada conjunto e desenvolve-se uma função de distribuição de probabilidade (FDP) desses FS. Uma das particularidades do método, sendo a maior diferença com os já citados, é o grande número de avaliações de FS que se faz necessário, fazendo com que mais testes gerem resultados melhores (SANDOVAL, 2012). Se mostrando concordante a isso, Crestani (2018) percebeu em seu trabalho que 2000 interações foram suficientes para gerar bons resultados pelo método de MC, encontrando valores de FS médios muito próximos aos provenientes da via

determinística. Harr (1987) disponibiliza a equação [2.8] como forma de se chegar a um número mínimo de simulações para se ter boa precisão.

$$N = \left[\frac{d^2}{4(1 - \varepsilon)^2} \right]^m \quad [2.8]$$

Onde: N é o número mínimo de tentativas necessário; d é o desvio padrão normal em relação ao nível de confiança; ε é o nível de confiança desejado; e m o número de variáveis aleatórias na entrada.

Silva (2015) vê como a maior vantagem do método, permitir maior simulação em uma análise, mas critica a demora do processamento que pode levar horas. Do mesmo ângulo, Silva, D (2019) sugere que, devido ao tempo gasto e à pouca praticidade do MC, o melhor seria a realização considerando apenas a superfície de ruptura do método determinístico. Inclinado a tal afirmação, Silva (2015) encontrou maior PF nas superfícies probabilísticas se comparadas às determinísticas, mas retrata que as primeiras são quantitativamente menores e por isso menos representativas. Assim, o autor assumiu a superfície crítica como a média das variáveis, pois afirma ser mais provável independentemente do método probabilístico. Vecci (2018) mostrou que MC, e também o FOSM, foram insensíveis perante à mudança da superfície de ruptura, uma vez visto que β se manteve quase o mesmo. Em contraponto, Giacon Junior (2018) destaca que a superfície de ruptura obtida com métodos determinísticos pode não corresponder com a real, podendo assim apresentar FS aceitável, mas PF não admissíveis.

FOSM é um método baseado na série de Taylor que, por meio desta, define a distribuição de probabilidade de uma função de variáveis aleatórias, fazendo aproximações analíticas da média e desvio padrão. Silva (2015) realça a grande vantagem da não necessidade do conhecimento da função de distribuição e a facilidade dos cálculos o põe em primeiro no pódio da simplicidade do trabalho de Vecci (2018). Outro destaque encontrado na literatura é a propriedade de demonstrar a importância dos parâmetros utilizados, expresso pelo fator de sensibilidade α_i , encontrado com a equação [2.9]. Por ela, Silva (2015) revela o ângulo de atrito e a coesão como mais importantes e com isso sugere como primária a utilização do FOSM, que permitiu desconsiderar o peso específico do solo como variável no MC e EP.

$$\alpha_i = \frac{\frac{\partial F_s}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F_s}{\partial x_i}\right)^2}} \quad [2.9]$$

A sequência de cálculo do método é descrita em Silva (2015) e significa o encontro da variância do fator de segurança, calculada com a fórmula [2.10], em que $V(FS)$ é a variância do FS, δFS_i é a diferença do fator de segurança determinístico (1° interação) com cada uma das outras interações referente ao parâmetro substituído, $V(X_i)$ é a variância de cada parâmetro e δX_i a variação em torno da média de cada parâmetro.

$$V(FS) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V(X_i) \quad [2.10]$$

$V(X_i)$ é encontrada a partir da raiz quadrada do desvio padrão, obtido com o CoV por meio da fórmula [2.11]. Sendo S o desvio padrão e \bar{X} a média dos parâmetros.

$$CoV = \left(\frac{S}{\bar{X}}\right)100\% \quad [2.11]$$

Realizando o somatório da fórmula [2.10], obtém-se as variâncias e a partir dela, utilizando da fórmula [2.12] do programa LibreOffice Calc, chega-se à probabilidade de falha do talude. O índice de confiabilidade advém da fórmula [2.13].

$$=DIST.NORM.N(1; FS det; S; 1) \quad [2.12]$$

$$\beta = \frac{FS det - 1}{S[FS]} \quad [2.13]$$

EP, ou método de Rosenblueth, é um método alternativo ao FOSM que consiste em aferir, em função das variáveis independentes, a média, desvio padrão e demais momentos da variável dependente. A utilização dos valores pontuais mínimos e máximos, a variância em torno das médias das variáveis independentes é o caminho para a definição dos momentos do FS. É também caracterizado como um método simples e de fácil aplicação, mas é definido por Vecchi (2018) como o método menos consistente devido à variabilidade com mudanças na superfície de ruptura, o que não ocorreu com o MC e o FOSM. Por outro lado, Silva, D (2019), conclui que, mesmo sendo mais rápido, aponta-se resultados confiáveis para o método EP, pois se obtiveram resultados próximos, de FS médio, desvio padrão médio e PF, aos de MC, apesar do método de MC ser mais eficiente

em avaliações analíticas mais complexas. Outra importante conclusão de Silva, D (2019) se refere a maior conveniência no uso da distribuição lognormal para o método, uma vez que a distribuição normal considera números negativos.

Observando a influência dos diferentes métodos de equilíbrio limite no complemento probabilístico, Vecci (2018) acentua a variação do índice de confiabilidade conforme o determinístico utilizado, resultando em β melhor para métodos rigorosos, recomendando o seu uso. Silva, B (2019), seguindo a mesma linha, aponta que o método de Bishop simplificado gerou maiores PF e Janbu menores, ficando o GLE/Morgenster-Price em posições intermediárias.

No mais, não se conclui se há um método mais confiável que outro e com isso Silva, D (2019) sugere o uso de pelo menos dois métodos probabilísticos para comparação. Verifica-se através de Giacon Junior (2018) e Crestani (2018) que o maior nível de incertezas e variação dos parâmetros, gera PFs maiores. Atenta-se a Silva, B (2019) quando esta salienta que nem toda a variabilidade é computada nas análises probabilísticas, pois variáveis relacionadas ao tempo são deveras complicadas. Mas como em Crestani (2018), com a probabilidade, incorporam-se as incertezas de modo direto.

Determinada a probabilidade de falha, faz-se necessário a avaliação de tolerância de seu valor, levando-se em conta os riscos de vidas e econômicos. Assim, Silva, D (2019) define a probabilidade tolerável como sendo função do risco que se deseja assumir, bem como suas consequências, citando gráficos de gerenciamento de riscos desenvolvidos por diferentes instituições e autores. Conclui a não ocorrência de valor específico de probabilidade tolerável, mas descreve o valor de 10^{-5} como consenso de topo a se atingir. Amaral (2011) aponta tanto a PF quanto o β como fatores a se analisar, apresentando a Tabela 2.4 ,retirada de USACE (1999), como classificação dos níveis de desempenho.

Tabela 2.4 – Índice de confiabilidade e probabilidade de falha admissível.

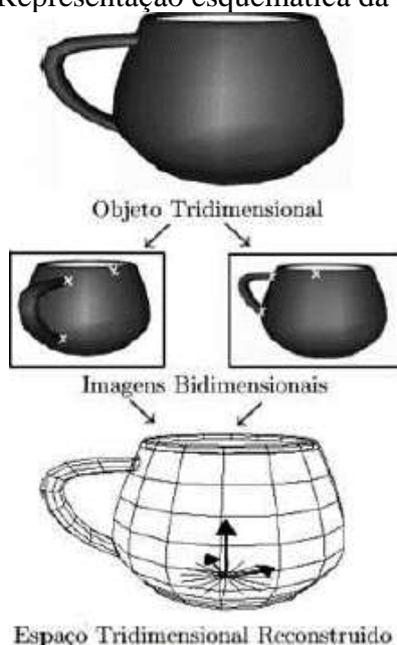
Nível de Desempenho Esperado	β	PF
Alto	5,0	3×10^{-7}
Bom	4,0	3×10^{-5}
Acima da média	3,0	3×10^{-3}
Abaixo da média	2,5	6×10^{-3}
Pobre	2,0	$2,5 \times 10^{-2}$
Insatisfatório	1,5	7×10^{-2}
Perigoso	1,0	$1,6 \times 10^{-1}$

Fonte: Adaptado de USACE (1999).

2.4. Fotogrametria Digital

A estabilidade e suas análises estão condicionadas pela topografia do talude: altura, inclinação e superfície; sendo imprescindíveis essas determinações. Para tal, a fotogrametria se apresenta como uma grande ferramenta, que, como dito por Minich *et al.* (2019), utiliza da fotografia como meio de obtenção de medidas. Coelho e Brito (2007) explicam o método como sendo a reconstrução de um espaço 3D a partir de imagens bidimensionais, pela gravação de ondas eletromagnéticas com um mesmo padrão. O processo é ilustrado com a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Representação esquemática da fotogrametria.



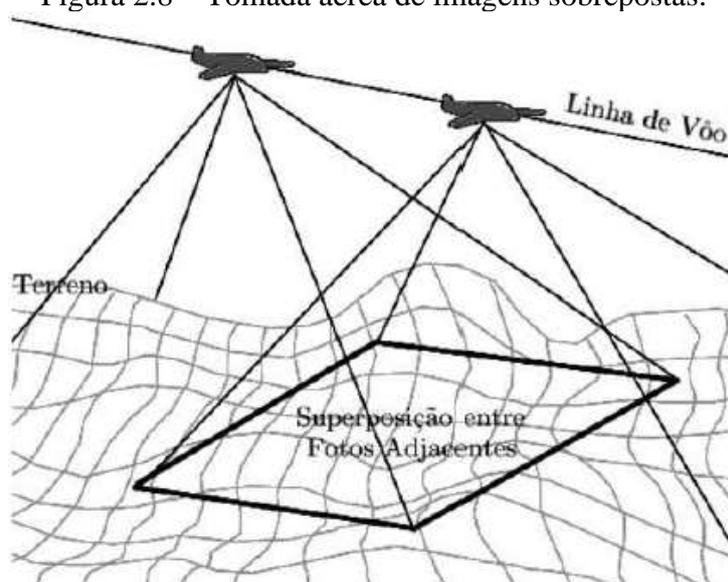
Fonte: Coelho e Brito 2007.

A execução, então, necessita da sobreposição de diferentes fotografias sobre o mesmo local (Figura 2.8), captando os padrões e gerando uma nuvem de pontos em modelos numéricos.

Como um novo método de fotogrametria, Westoby *et al* (2012) descreve a *Structure from Motion (SfM – Estruturas do movimento)* como uma técnica emergente de baixo custo, com capacidade de alta resolução na reconstrução tridimensional, sendo a mais avançada tecnologia desenvolvida com a medição por fotos. Descreve seu diferencial como sendo a automática resolução da posição da câmera, orientação e a geometria das capturas de imagens, sem a necessidade de conhecimento prévio sobre o posicionamento 3D dos alvos. Como consequência, os pontos gerados no modelo são relativos ao próprio espaço da imagem, precisando ser referenciadas com coordenadas do mundo real, que podem ser pelo levantamento de alguns pontos no solo, por GPS, ou

como a prática mais usual de determinar alvos físicos com bom contraste antes das fotografias. No trabalho de Minich *et al.* (2019), observa-se um erro de posicionamento devido a acurácia do GPS, tendo sido corrigido com medições *in situ*. Nesta produção, a técnica também se mostra vantajosa em relação ao tempo de processamento, com uma agilidade maior que as metodologias tradicionais, onde a simplicidade se fez presente. Outra diferença é a não necessidade de utilização de equipamentos especiais, como câmeras métricas, podendo se utilizar câmeras digitais comuns.

Figura 2.8 – Tomada aérea de imagens sobrepostas.



Fonte: Coelho e Brito 2007.

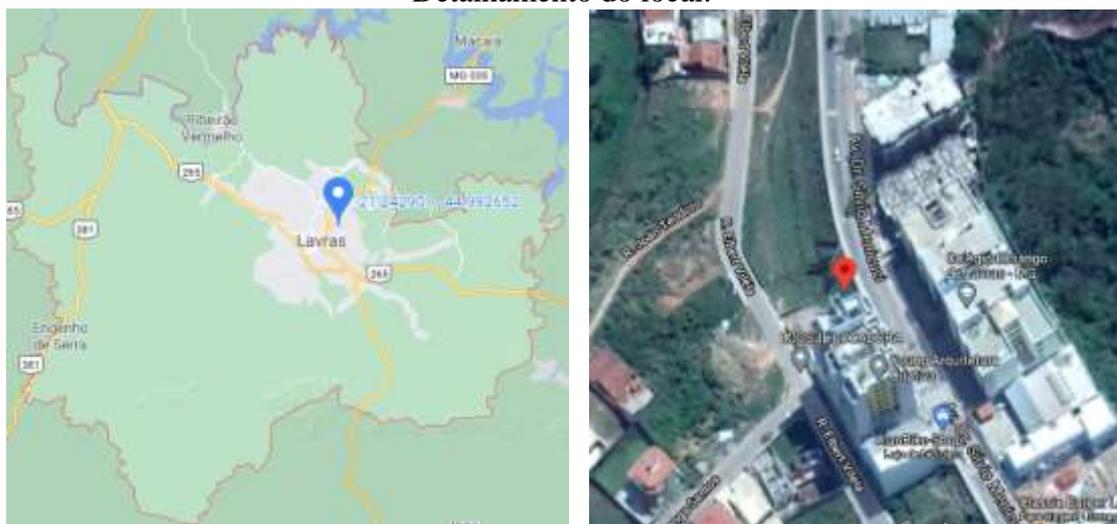
Com o aumento da tecnologia dos veículos aéreos não tripulados (VANTs), refletida em menores tamanhos e preços, a fotogrametria pode ser realizada remotamente. Westoby *et al* (2012). ressalta a vantagem de poder ser usado em terrenos hostis, onde não permitem a chegada de GPS e estação total.

3 METODOLOGIA

3.1. Levantamento topográfico e modelo tridimensional

A área estudada encontra-se dentro do perímetro urbano da cidade de Lavras/MG, especificamente na Avenida Doutor Sílvio Menicucci e pode ser visualizada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Localização da área de estudo: a) Dentro do município de Lavras/MG, b) Detalhamento do local.



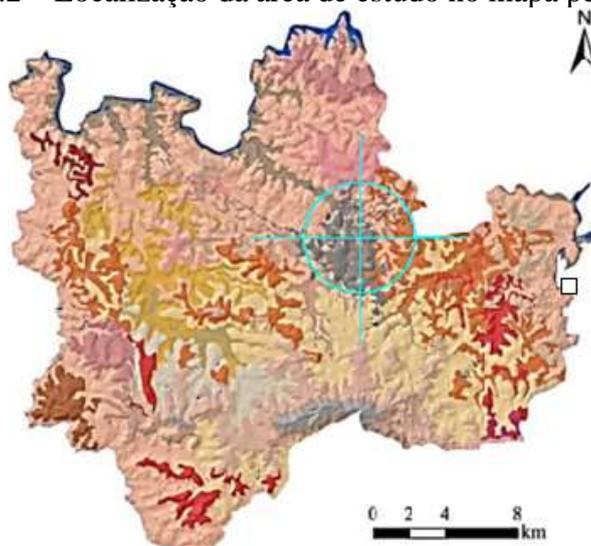
a)

b)

Fonte: Google.

Sem meios de realizar sondagens e ensaios de identificação do solo e suas camadas estratigráficas, tomou-se como fonte de informações o levantamento pedológico de Silva (2018), efetuado sobre todo o município de Lavras. O mapa de solos foi cotejado com este da Figura 3.1a, determinando o tipo de solo no talude estudado como argissolo vermelho-amarelo distrófico típico (FIGURA 3.2). Admitiu-se talude homogêneo.

Figura 3.2 – Localização da área de estudo no mapa pedológico.



Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Levantou-se a topografia do terreno pelo método da fotogrametria digital, realizada no dia 26 de julho de 2020 entre 8 e 8:30 h da manhã. Foi utilizado um VANT Phantom 4 Pro V2.0 que sobrevoou o local, registrando-o em 81 fotografias. Estas foram inseridas na versão estudantil gratuita do software 3DF Zephyr que sobrepôs as imagens, gerando uma nuvem de pontos espaçadas, uma nuvem de pontos densa e, posteriormente, efetuou a texturização da imagem (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Modelo tridimensional.



Fonte: Do autor (2020).

Não foi necessário realizar ajuste de escala no modelo tridimensional digital gerado, que apresentou precisão de distâncias medidas no local de 99,41%, referente a medição realizada no portão (Figura 3.4 a), e 99,33%, referente a medida retirada do passeio (Figura 3.4 b), com as medidas reais sendo 5,93 e 1,47 m respectivamente.

Figura 3.4 – Medidas de referência: a) medida do portão, b) medida do passeio.

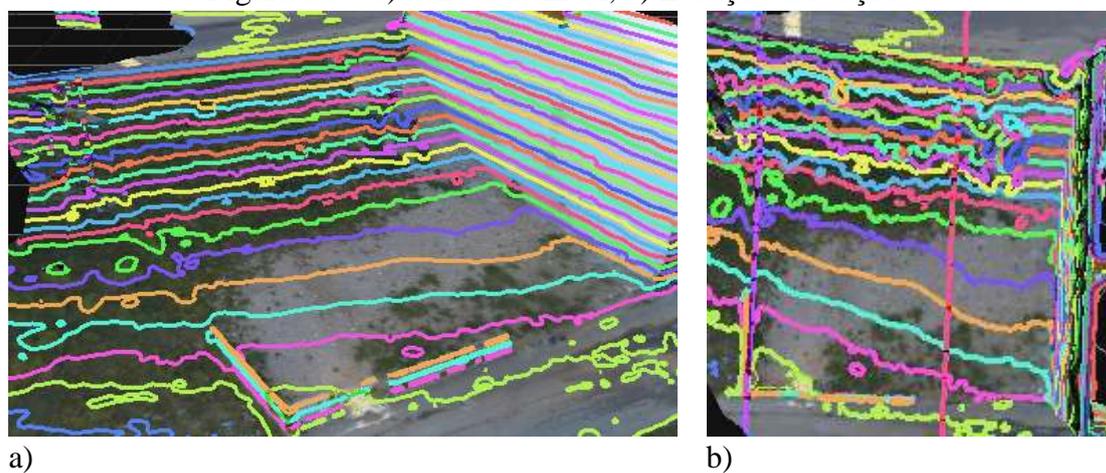


Fonte: Do autor (2020).

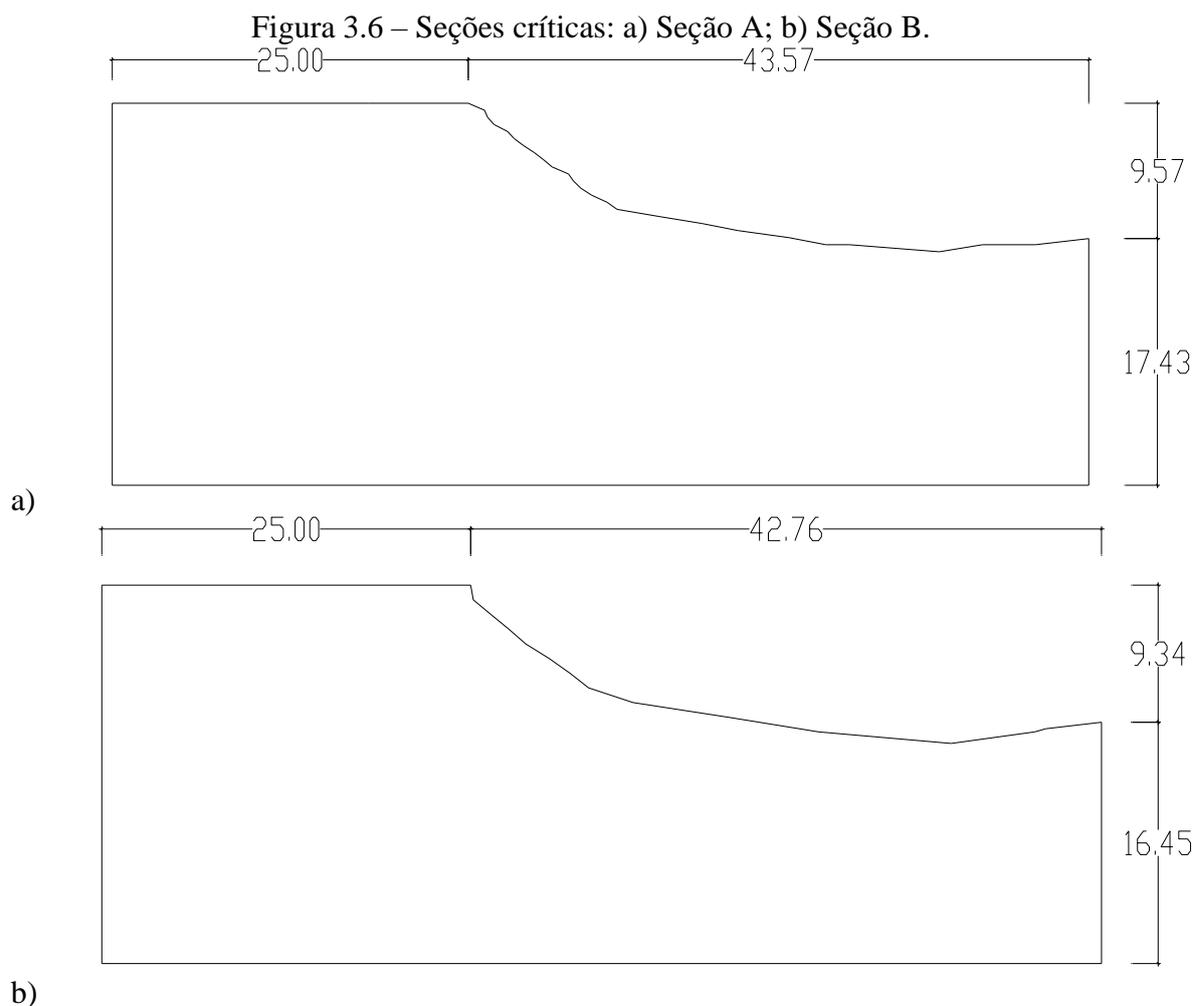
3.2. Curvas de nível e seções críticas

É possível extrair as curvas de nível do terreno, bem como retornar seções de planos de corte estabelecidos, por meio do programa 3DF Zephyr. Ambos podem ser exportados em formato compatível com o *input* do programa Slope/W. Por meio das curvas de nível, foram definidas duas seções de maior inclinação, consideradas críticas (FIGURA 3.6), nomeadas Seção A e Seção B.

Figura 3.5 – a) Curvas de nível, b) Locação das seções.



Fonte: Do autor (2020).



Fonte: Dou autor (2020).

3.3. Parâmetros de resistência utilizados e suas variabilidades

A determinação dos parâmetros de resistência do solo é imprescindível para uma análise de estabilidade de taludes, e deve ser realizada especificamente com o solo do local de estudo. Contudo, devido às circunstâncias de isolamento social quando este trabalho foi desenvolvido, e sendo o objetivo deste a comparação entre os métodos de determinação de segurança probabilísticos e determinísticos, julgou-se não o trazer prejuízos a utilização de parâmetros previamente determinados em laboratório. Assim, utilizaram-se os parâmetros divulgados por Rocha (2002), determinados especificamente para cinco tipos de solo do território lavrense (TABELA Tabela 3.1). Rocha (2002) utiliza amostras indeformadas retiradas a uma profundidade de -0,03 m da superfície, satura o conjunto e as submete a ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 3.1 – Dados dos solos de Lavras.

Classe de solo	Ds (kg/dm ³)	Argila (g/kg)	Areia (g/kg)	Silte (g/kg)	Umidade a -0,01 MPa (kg/kg)	Ângulo de atrito, ϕ (°)	Coesão, c (kPa)
LVdf	1,15	570	160	270	0,21	23,75	12,56
LVd	1,12	570	250	180	0,22	6,30	38,39
LVAd	1,31	310	460	230	0,29	11,30	40,68
PVAd	1,29	370	390	240	0,28	7,80	42,39
CXbd	1,19	396	150	460	0,25	8,97	33,39

Legenda: LVdf: latossolo vermelho distroférico; LVd: latossolo vermelho distrófico; LVAd: latossolo vermelho-amarelo distrófico; PVAd: argissolo vermelho-amarelo distrófico típico; CXbd: cambissolo háplico tb distrófico típico.

Fonte: Adaptado de Rocha (2002).

O solo da área estudada é um PVAd. Os coeficientes de variação (CoV) dos parâmetros foram calculados segundo Tabela 2.3. Para o método FOSM, tanto Silva (2015) quanto Vecci (2018), baseados na literatura, adotam a variação em torno da média de cada variável (δX_i) como 10%, valor também admitido por este trabalho. A Tabela 3.2 resume os parâmetros e seus respectivos CoV.

Tabela 3.2 – Dados dos parâmetros.

Parâmetro	Média	CoV (%)
ϕ	7,80°	10
c	42,39 kPa	40
γ	12,65 kN/m ³	3

Fonte: Do autor (2020).

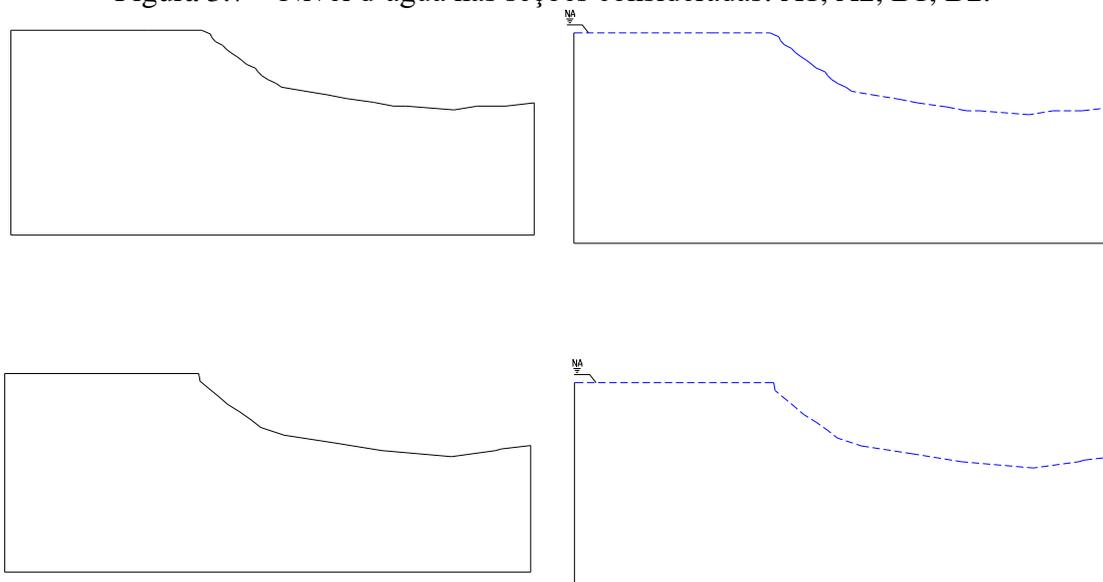
3.4. Análises determinísticas e probabilísticas

Foram escolhidos os métodos determinísticos Morgenstern-Price, rigoroso, como aconselhado por Vecci (2018), e Bishop, método simplificado, permitindo observar o efeito de cada tipo sobre a PF e β . O complemento probabilístico veio por meio dos métodos FOSM e Monte Carlo, dois métodos para a comparação e checagem da assertividade dos resultados. As análises determinísticas e probabilística de Monte Carlo foram realizadas por meio da versão teste gratuita do software Slope/W. A análise por FOSM, com um número de interações que permite um cálculo manual, foi realizada com tabelas interativas desenvolvidas no software LibreOffice Calc.

Lavras está inserida, oficialmente, segundo IBGE (2019), no bioma da mata atlântica. Porém, analisando informações de séries históricas retiradas do Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), o regime de chuvas no município é marcado por período de intensa chuva (setembro a março) intercalado por período de longa estiagem (março a setembro), característico do bioma cerrado, resultando em duas situações de nível d'água extremamente distintas. Isto posto, as seções críticas A e B foram analisadas

nas condições seca (1) e saturada (2), resultando em quatro seções aqui definidas: Seção A1, Seção A2, Seção B1 e Seção B2.

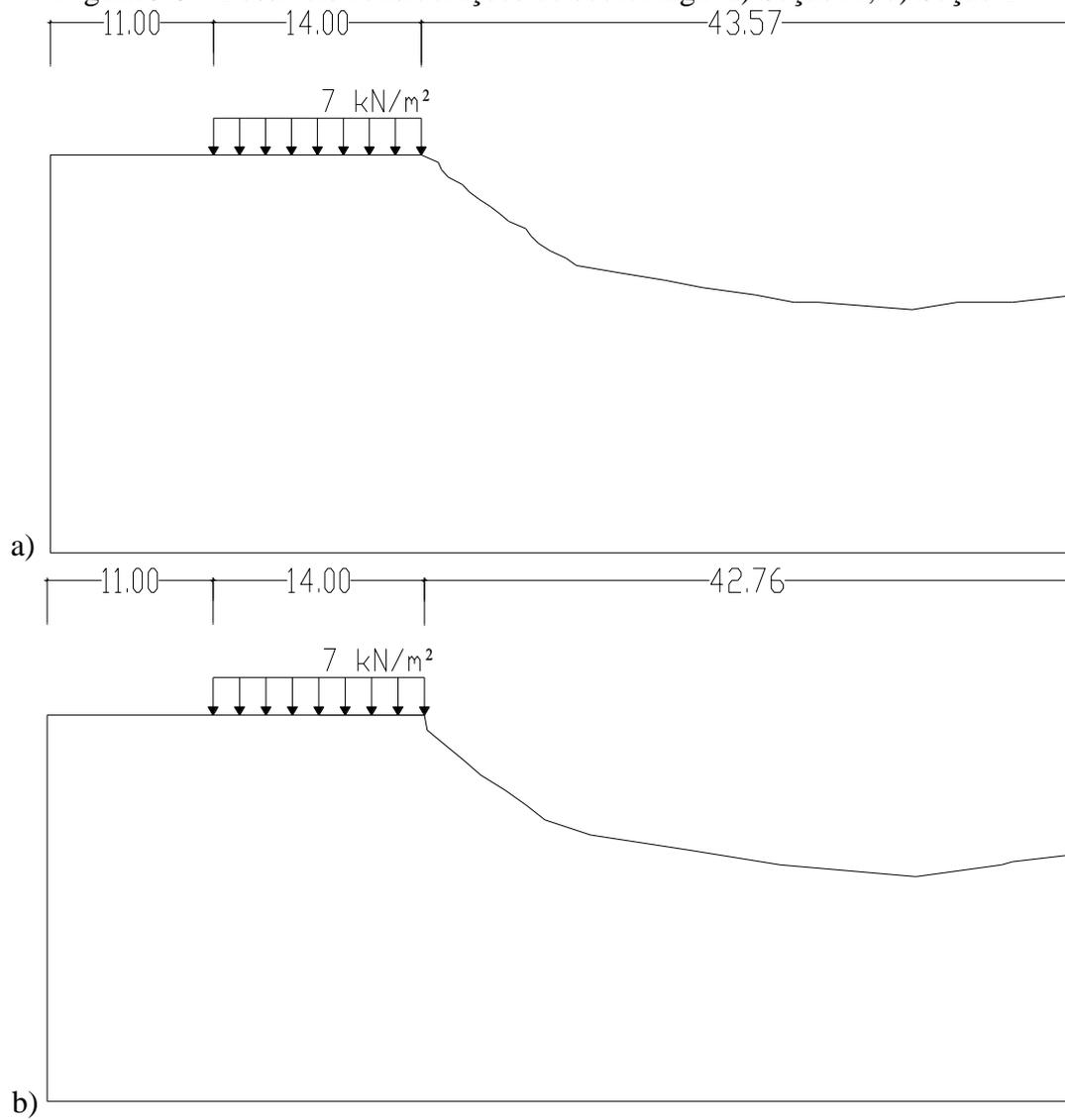
Figura 3.7 – Nível d'água nas seções consideradas: A1, A2, B1, B2.



Fonte: Do autor (2020).

Como mencionado no Capítulo 1, há uma via com grande tráfego de veículos automotores na crista do talude estudado, com fluxo tanto de pequenos carros quanto de caminhões de carga. Assim, de forma a aumentar o realismo na situação proposta, foi atribuída uma sobrecarga na crista do talude de 7 kN/m^2 aplicada a um comprimento de 14 m da seção, o que se aproxima de dois caminhões Truck em uma avenida com duas faixas de fluxo. Essa sobrecarga foi aplicada na seção que apresentou os resultados mais desfavoráveis quanto à estabilidade e possibilitou o estudo da influência de sobrecargas na probabilidade de falha e no índice de confiabilidade. A Figura 3.8 mostra as possíveis situações onde a sobrecarga será considerada.

Figura 3.8 – Possíveis considerações de sobrecarga: a) Seção A; b) Seção B.



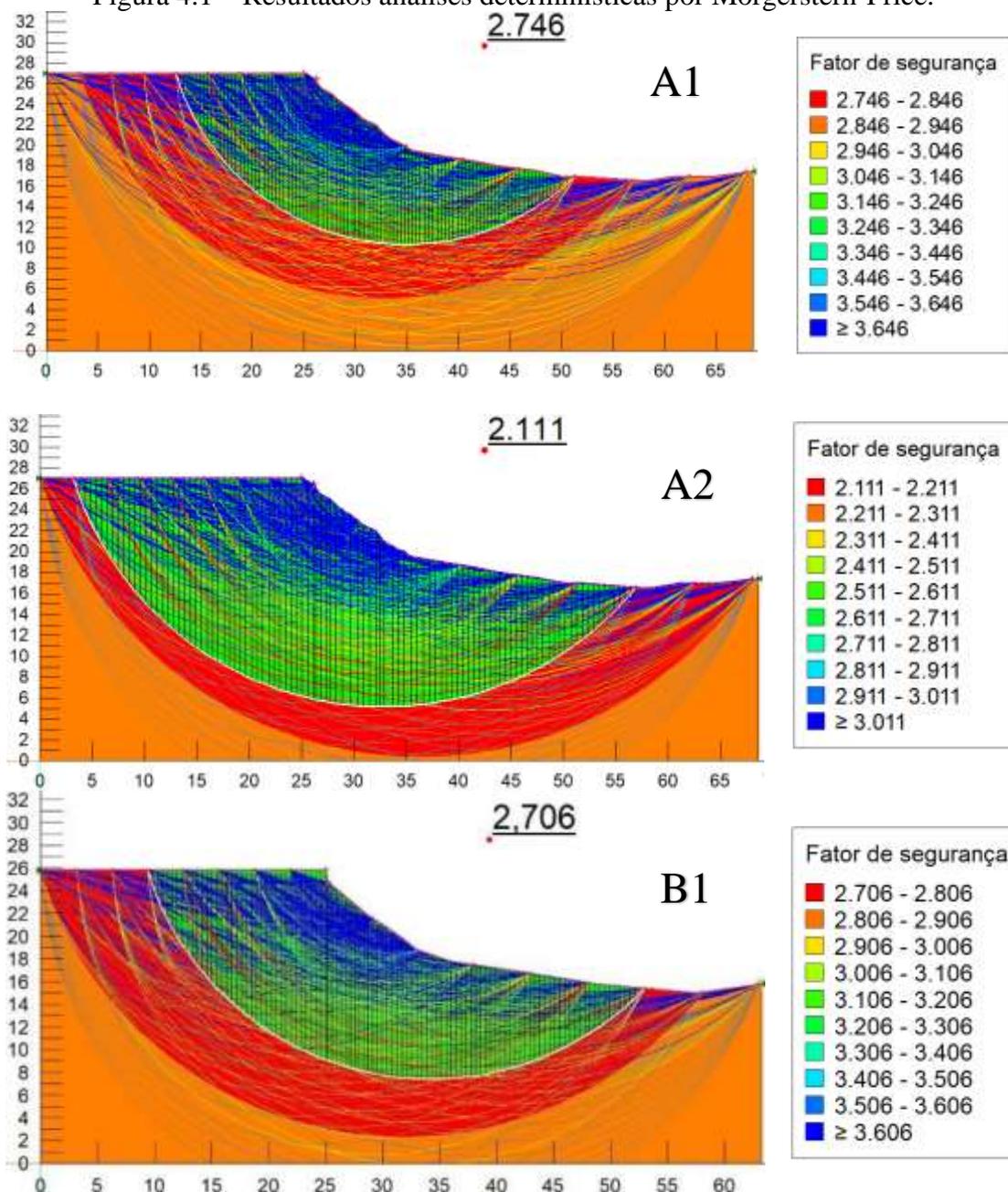
Fonte: Do autor (2020).

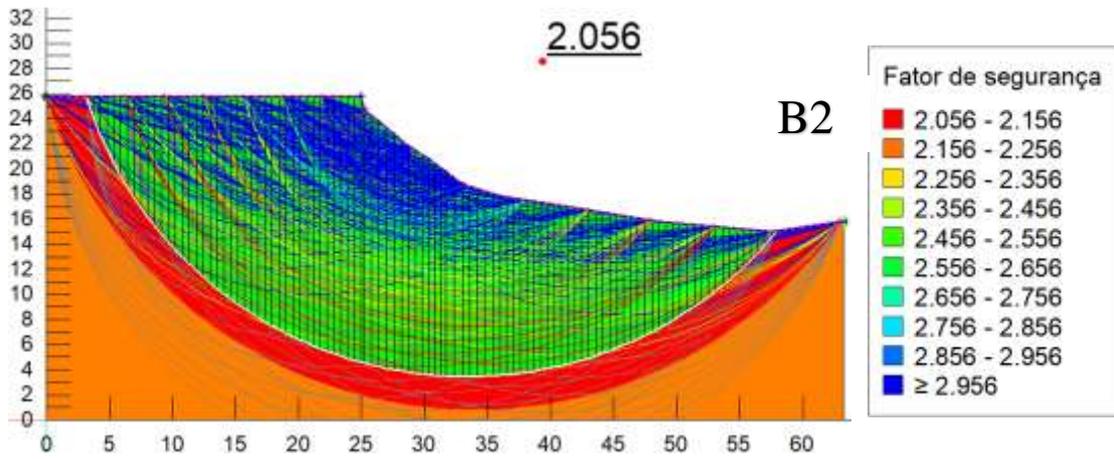
4 RESULTADOS

4.1. Análises determinística

A seguir, tem-se os resultados das análises determinísticas para as 4 seções definidas, utilizando o método de entrada e saída no Slope/W que permite a determinação de um intervalo ao longo do talude, onde a superfície de ruptura deverá se encontrar. Dividiu-se a superfície em 100 fatias que foram calculadas com um número máximo de 2000 interações e diferença tolerável de FS=0,001. Visualizam-se os resultados com a Figura 4.1.

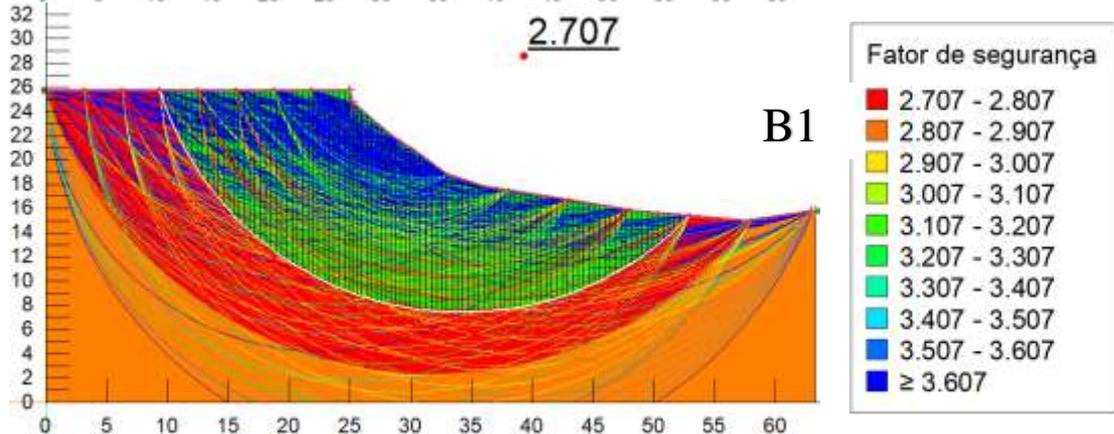
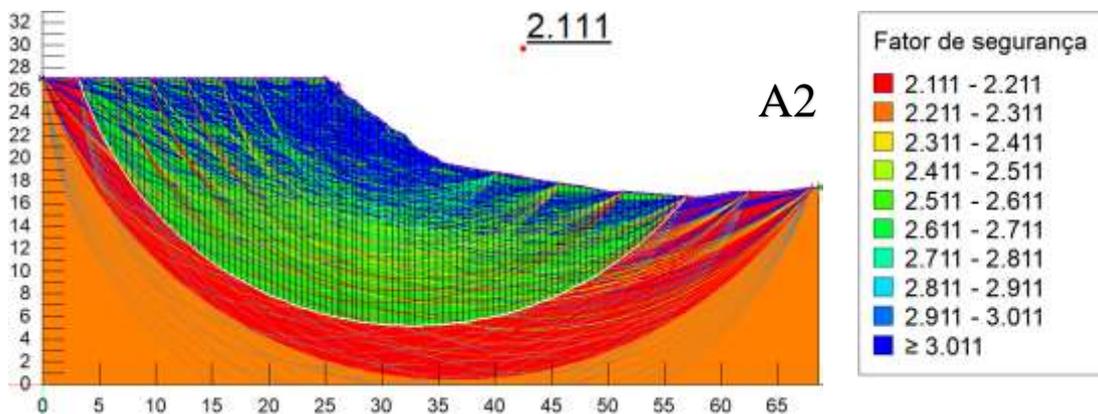
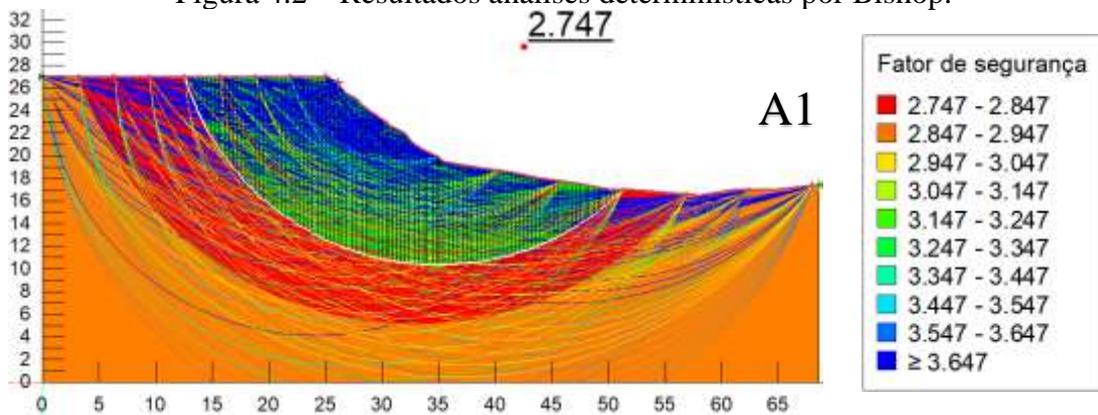
Figura 4.1 – Resultados análises determinísticas por Morgenstern-Price.

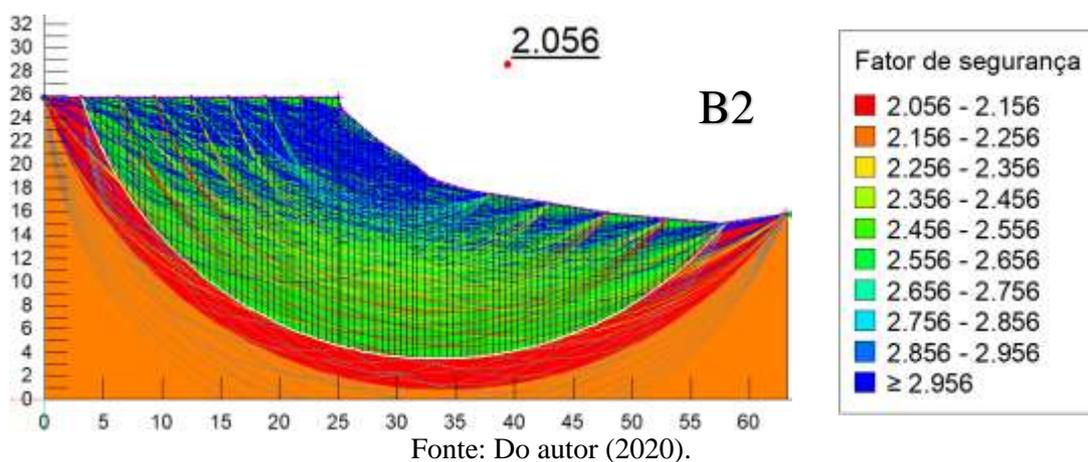




Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.2 – Resultados análises determinísticas por Bishop.





Um compilado dos resultados se encontra na Tabela 4.1 – Resultados determinísticos..

Tabela 4.1 – Resultados determinísticos.

Métodos	FS Seção A1	FS Seção A2	FS Seção B1	FS Seção B2
Morgerstern-Price	2,746	2,111	2,706	2,056
Bishop	2,747	2,111	2,707	2,056

Fonte: Do autor (2020).

Como esperado, o nível d'água impactou fortemente os resultados, podendo nas épocas chuvosas ter uma queda em seu fator de segurança de 23,12% (Morgerstern-Price) e 23,15% (Bishop) para a seção A, e de 24,02% (Morgerstern-Price) e 24,05% (Bishop) olhando para a seção B. As diferenças entre as seções A e B podem ser atribuídas a variação da inclinação do talude, em que esta diferença, mais expressivamente, se fez na presença de água. Entre os dois métodos, pouco se observou de diferença, onde a maior foi de 0,037% na seção B1.

4.2. Análise por FOSM

Como recomendado por Silva (2015), o FOSM foi o método probabilístico primariamente realizado, a fim de revelar a sensibilidade de cada parâmetro. Seu número de interações consiste no número de parâmetros mais a verificação determinística, ou seja: $3 + 1 = 4$, para cada método, substituindo em cada interação a média do valor de determinado parâmetro pelo valor máximo com a variação (δX_i) de 10%. Sendo a média, os valores determinísticos dos parâmetros, tem-se a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Variação de cada parâmetro.

Parâmetro	Média	δX_i 10%	Média + δX_i
Ângulo atrito	7,8	0,78	8,58
Coesão	42,39	4,239	46,629
Peso específico	12,65	1,265	13,915

Fonte: Do autor (2020).

Cada interação teve sua análise executada no Slope/W e está registrada no anexo 1. A visualização das interações está na Tabela 4.3 e os resultados dos fatores de segurança para cada seção estão dispostas nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3 – Interações.

Parâmetro	1° interação	2° interação	3° interação	4° interação
Ângulo atrito	7,8	8,58	7,8	7,8
Coesão	42,39	42,39	46,629	42,39
Peso específico	12,65	12,65	12,65	13,915

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.4 – FS das interações em Morgerstern-Price.

Seções	FS 1° interação	FS 2° interação	FS 3° interação	FS 4° interação
A1	2,746	2,810	2,954	2,554
A2	2,111	2,128	2,305	1,994
B1	2,706	2,776	2,907	2,523
B2	2,056	2,073	2,244	1,947

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.5 – FS das interações em Bishop.

Seções	FS 1° interação	FS 2° interação	FS 3° interação	FS 4° interação
A1	2,747	2,812	2,955	2,555
A2	2,111	2,128	2,305	1,995
B1	2,707	2,778	2,909	2,525
B2	2,056	2,073	2,244	1,947

Fonte: Do autor (2020).

Seguindo a metodologia de cálculo descrita no capítulo dois, utilizando as fórmulas [2.10] e [2.11], tem-se os resultados da variância de FS pelas tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 – Sequência de cálculo de V(FS) por Morgerstern-Price.

Seção	Parâmetro	δFS_i	S	V(X _i)	$\left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V(X_i)$
A1	Ângulo atrito	-0,064	0,78	0,6084	0,0041
	Coesão	-0,208	16,956	287,5059	0,6922
	Peso específico	0,192	0,3795	0,14402	0,0033
A2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,194	16,956	287,5059	0,6022
	Peso específico	0,117	0,3795	0,14402	0,0012
B1	Ângulo atrito	-0,07	0,78	0,6084	0,0049
	Coesão	-0,201	16,956	287,5059	0,6464
	Peso específico	0,183	0,3795	0,14402	0,0030
B2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,189	16,956	287,5059	0,5655
	Peso específico	0,109	0,3795	0,14402	0,0011

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.7 – Sequência de cálculo de V(FS) por Bishop.

Seção	Parâmetro	δFS_i	S	V(X _i)	$\left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V(X_i)$
A1	Ângulo atrito	-0,065	0,78	0,6084	0,0042
	Coesão	-0,208	16,956	287,5059	0,6922
	Peso específico	0,192	0,3795	0,14402	0,0033
A2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,194	16,956	287,5059	0,6022
	Peso específico	0,116	0,3795	0,14402	0,0012
B1	Ângulo atrito	-0,071	0,78	0,6084	0,0050
	Coesão	-0,202	16,956	287,5059	0,6529
	Peso específico	0,182	0,3795	0,14402	0,0030
B2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,188	16,956	287,5059	0,5655
	Peso específico	0,109	0,3795	0,14402	0,0011

Fonte: Do autor (2020).

Com o prosseguimento, firma-se a V(FS) realizando o somatório e chega-se a PF e ao β por meio das fórmulas [2.12] e [2.13]. A Tabela 4.8 e Tabela 4.9 dão os resultados.

Tabela 4.8 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade para Morgenstern-Price.

Seção	V(FS)	PF (%)	β
A1	0,6996	1,8426	2,0874
A2	0,6037	7,6373	1,4299
B1	0,6543	1,7471	2,1090
B2	0,5669	8,0372	1,4026

Fonte: Do autor (2020).

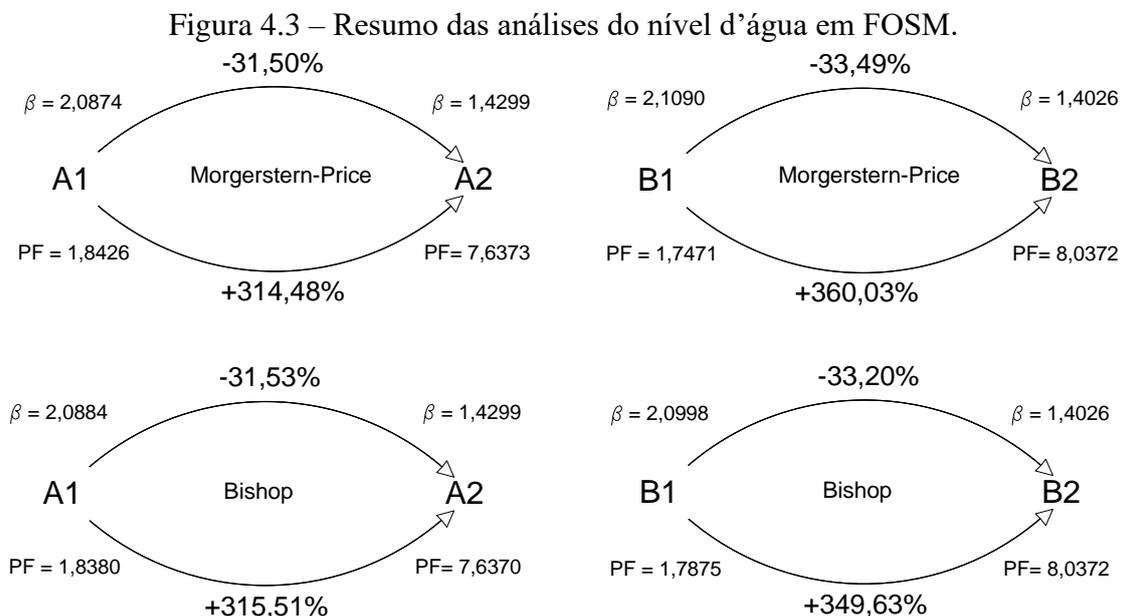
Tabela 4.9 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade para Bishop.

Seção	V(FS)	PF (%)	β
A1	0,6998	1,8380	2,0884
A2	0,6037	7,6370	1,4299
B1	0,6609	1,7875	2,0998
B2	0,5669	8,0372	1,4026

Fonte: Do autor (2020).

Verificando os resultados, tem-se a forte influência do nível de água sobre a PF, que gera um aumento de 314,48% de A1 para A2 e de 360,03% de B1 para B2, utilizando Morgenstern-Price. Em Bishop, esse aumento significou 315,51% de A1 para A2 e de 349,63% de B1 para B2. Já referente ao β , este obteve uma redução de 31,50% de A1 para A2 e de 33,49% de B1 para B2 em Morgenstern-Price, sendo que para Bishop ficou 31,53% de A1 para A2 e 33,20% de B1 para B2, diminuindo a confiabilidade. Estes

valores ainda reforçam a proximidade entre os dois métodos determinísticos. A análise é resumida na Figura 4.3.

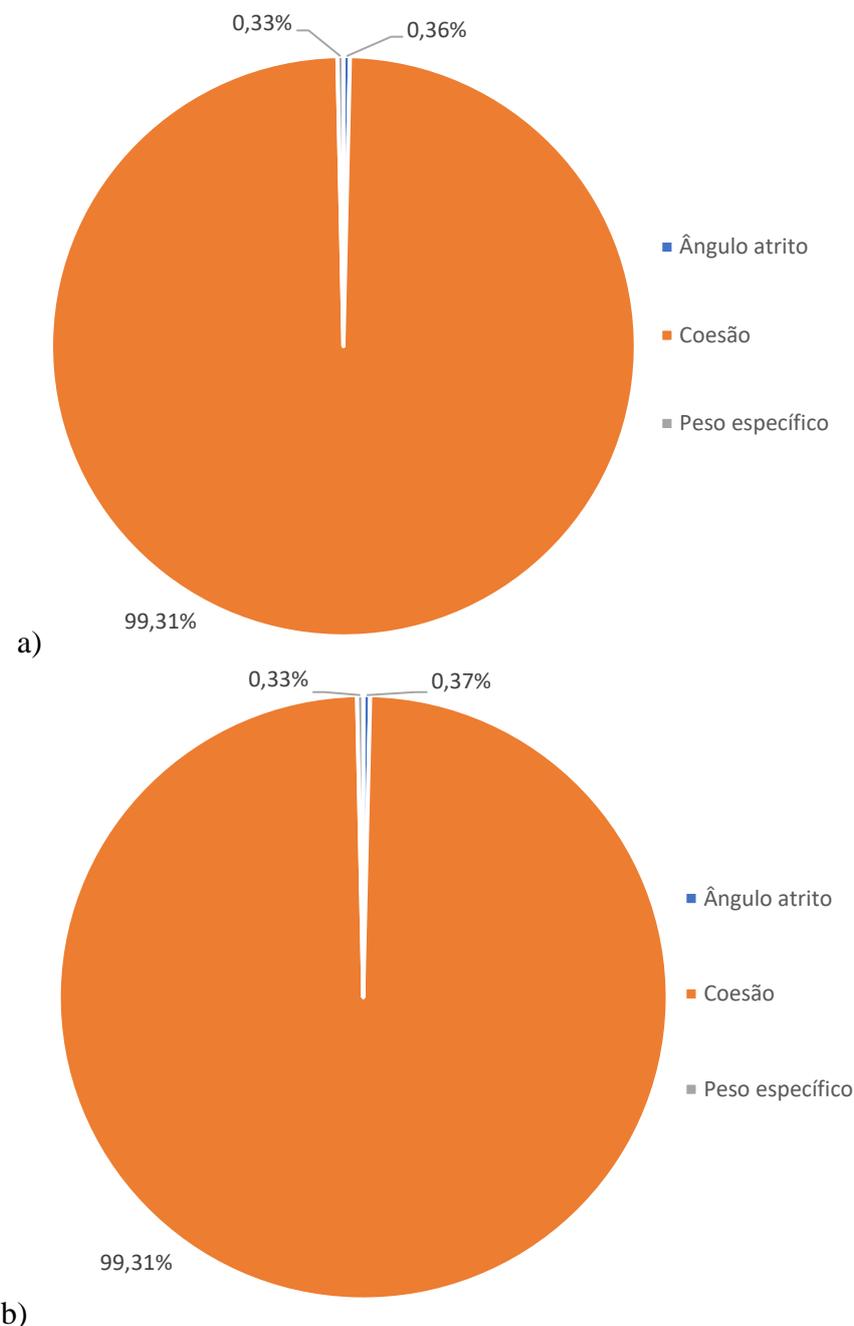


Fonte: Do autor (2020)

Em primeira análise dos resultados da PF e β , comparando a Tabela 2.4, observa-se um alto valor da probabilidade de falha, com valores acima do nível perigoso, e um índice de confiabilidade entre pobre e perigoso. Afirmarões sobre o risco do talude serão realizadas após a análise de Monte Carlo, com comparações de resultados.

Finalizando o método, é apurada a influência de cada parâmetro nos resultados, fazendo a razão dos valores da última coluna da Tabela 4.6 e Tabela 4.7 pelo todo da variância. Com a existência de contribuições diferentes variando de acordo com a seção, é apresentada a média das influências em cada método determinístico utilizado, visto a pouca relevância da diferença no resultado. Assim, a última contabilidade da seção é alocada com a Figura 4.4.

Figura 4.4 – Influência dos parâmetros: a) Morgerstern-Price.e b) Bishop.



Fonte: Do autor (2020).

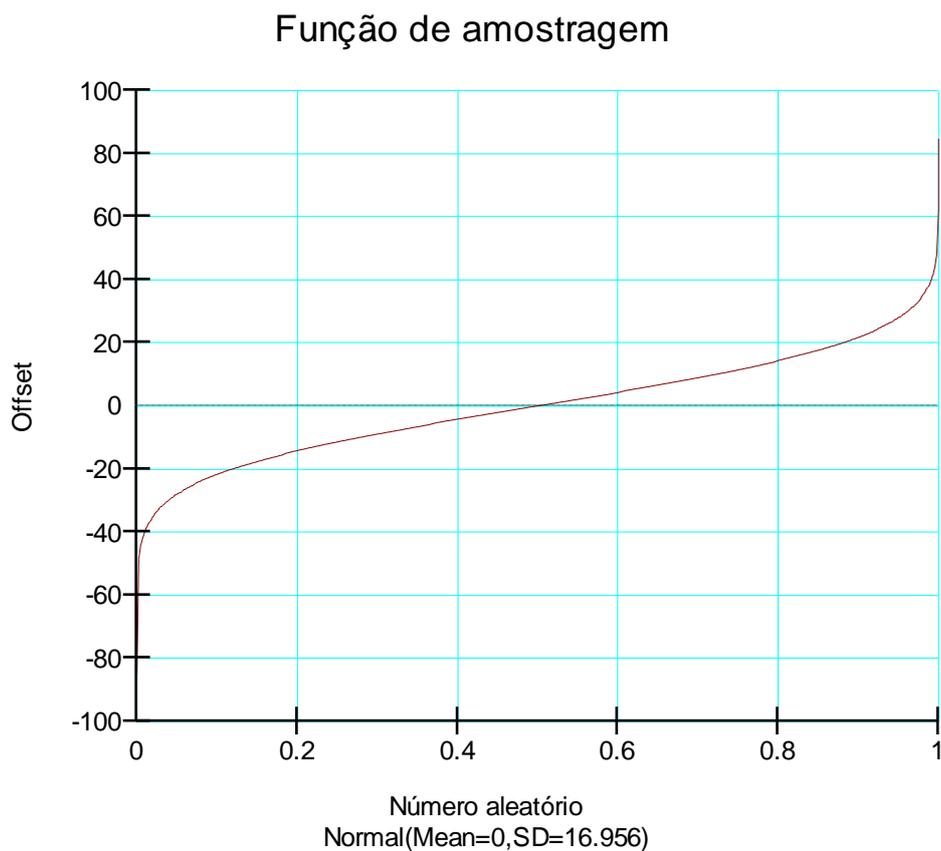
4.3. Análise de Monte Carlo

A partir da análise por FOSM, tem-se uma influência altamente superior da coesão sobre a PF, comparado aos demais com baixa significância. Isso libera a utilização da coesão como única variável aleatória no método de Monte Carlo, visto o grande número de interações requeridas e a demora no processamento. A variação da coesão é obtida através de seu CoV e é ilustrado com a Figura 4.5.

Figura 4.5 – a) Função densidade de probabilidade e b) função de amostragem para a coesão.



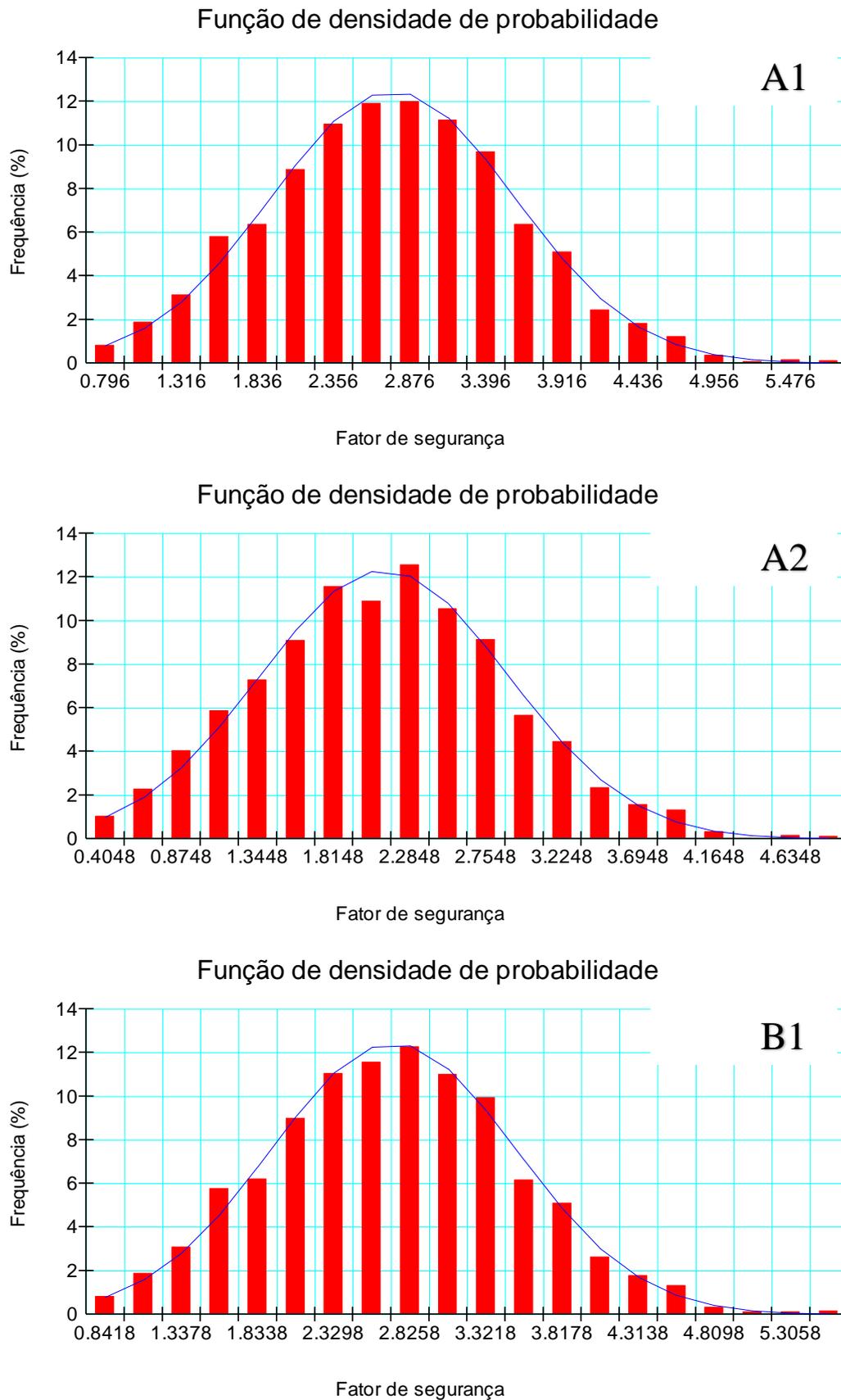
a)

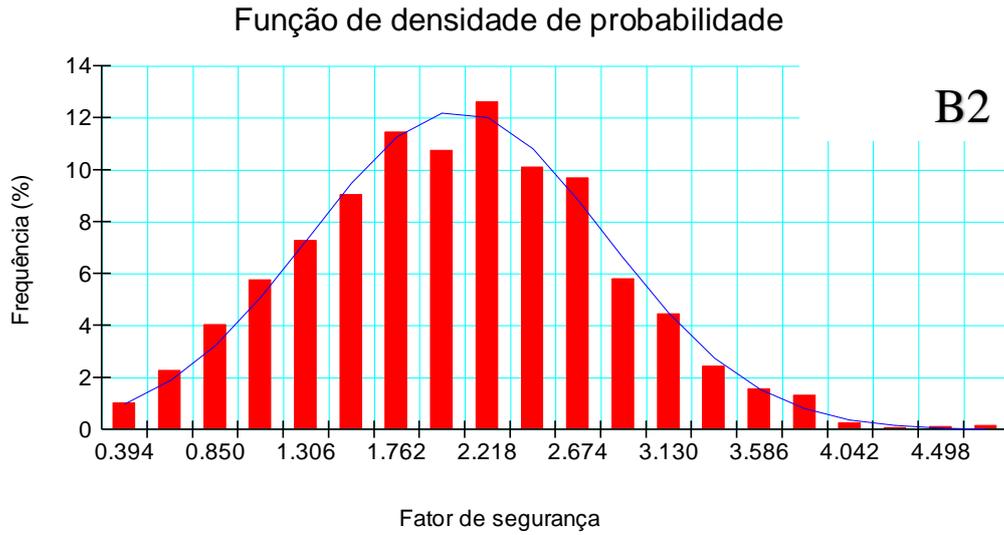


b)

Captou-se de Monte Carlo, por meio do Slope/W, a PF, o β , o FS médio e o desvio padrão, bem como o retorno dos gráficos da função densidade de probabilidade. A Figura 4.6 e Figura 4.7 revelam as funções de distribuição encontradas.

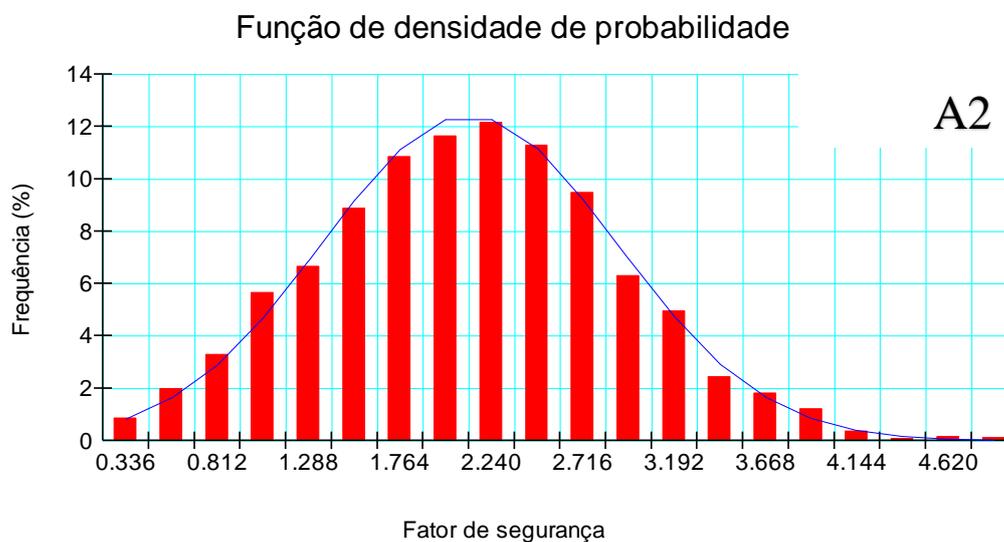
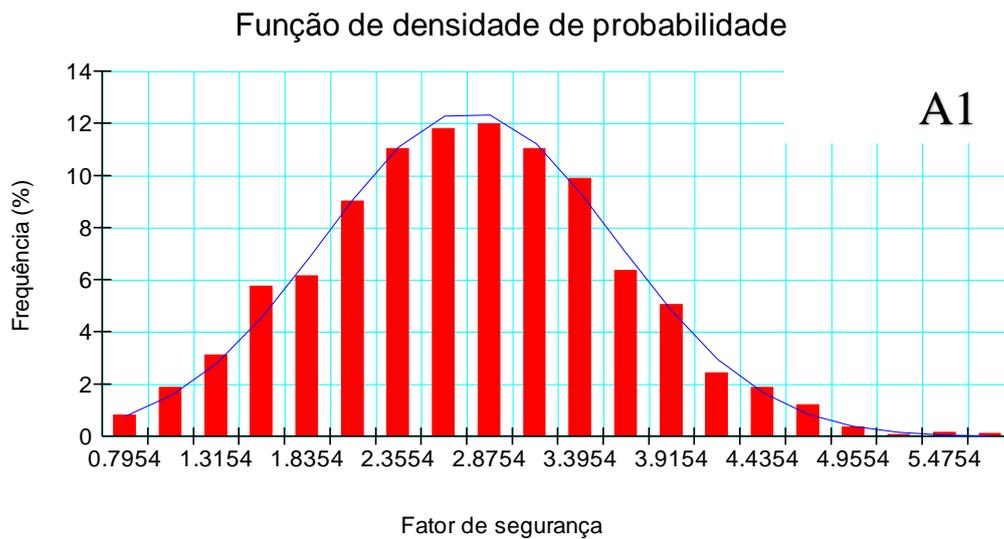
Figura 4.6 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Morgenstern-Price.: A1, A2, B1 e B2.

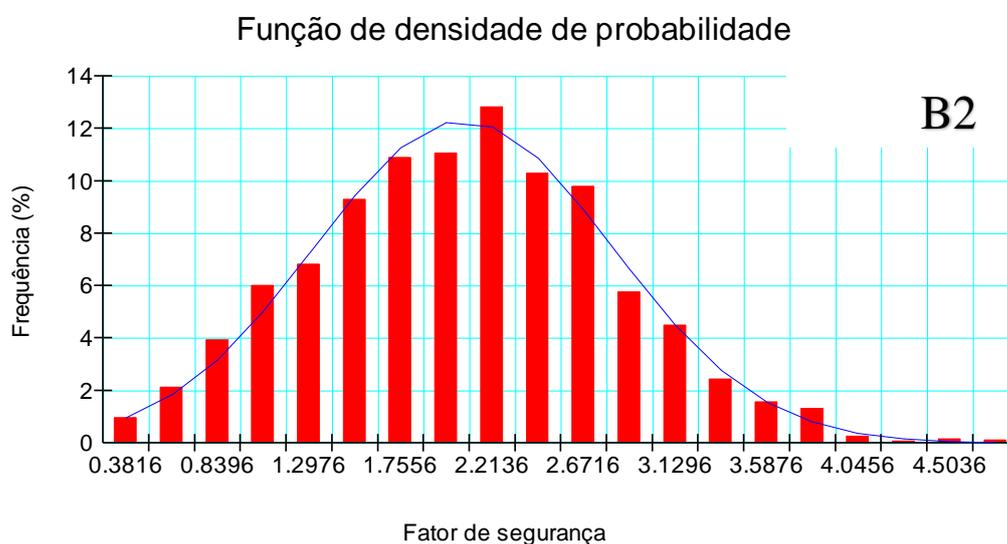
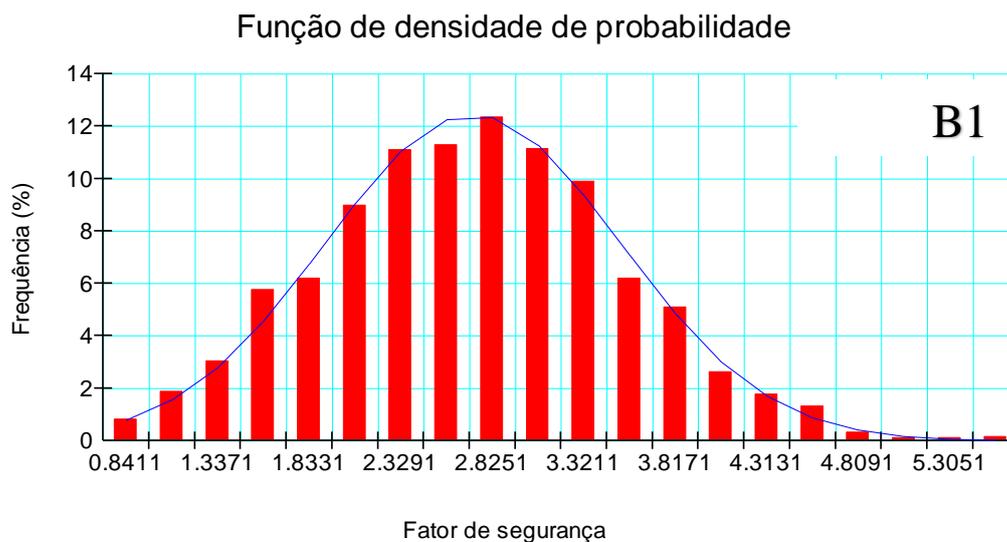




Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.7 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Bishop.: A1, A2, B1 e B2.





Fonte: Do autor (2020).

Os resultados encontram-se resumidos nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

Tabela 4.10 – Resultado de Monte Carlo para Morgerstern-Price.

Seção	FS médio	S	PF (%)	β
A1	2,7572	0,83692	1,058468	2,0996
A2	2,1243	0,76753	7,413011	1,4648
B1	2,7174	0,80015	0,907258	2,1464
B2	2,0679	0,74757	8,119012	1,4285

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.11 – Resultado de Monte Carlo para Bishop.

Seção	FS médio	S	PF (%)	β
A1	2,7585	0,83687	1,058468	2,1013
A2	2,1232	0,76904	7,459677	1,4605
B1	2,7188	0,80013	0,907258	2,1481
B2	2,0678	0,74811	8,119012	1,4273

Fonte: Do autor (2020).

O FS médio de Monte Carlo ficou bem próximo do FS médio do FOSM, que é o mesmo FS determinístico. Essa proximidade se caracteriza com todos os valores de FS médio de FOSM sendo mais de 99% dos de Monte Carlo, independentemente do método determinístico ou seção. As PFs de Monte Carlo foram em sua maioria menores em relação ao FOSM, com exceção as análises de B2, sendo bem próximas nas seções saturadas (A2 e B2), e com uma considerável diferença nas seções secas (A1 e B1). Já com o índice de confiabilidade, todos os valores de Monte Carlo tiveram um padrão de superioridade em relação aos de FOSM, mas com diferenças bem diminutas. As tabelas 4.12 e 4.13 apresentam comparações das PFs de Monte Carlo com FOSM e a comparação de β de FOSM com Monte Carlo.

Tabela 4.12 – Comparação da PF e β entre os métodos probabilísticos por Morgenstern-Price.

Seção	PF	β
A1	57,44%	99,42%
A2	97,06%	97,62%
B1	51,93%	98,26%
B2	101,02%	98,19%

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.13 – Comparação da PF e β entre os métodos probabilísticos por Bishop.

Seção	PF	β
A1	57,59%	99,39%
A2	97,68%	97,90%
B1	50,76%	97,75%
B2	101,02%	98,27%

Fonte: Do autor (2020).

Assim, pode-se visualizar melhor a diferença de PF nas seções secas, em que Monte Carlo se conformou com quase a metade de FOSM. Outro ponto de reflexão é sobre a pequena diferença dos índices de confiabilidade, mas que mesmo assim, pelo padrão, configurou Monte Carlo como um método de maior confiabilidade.

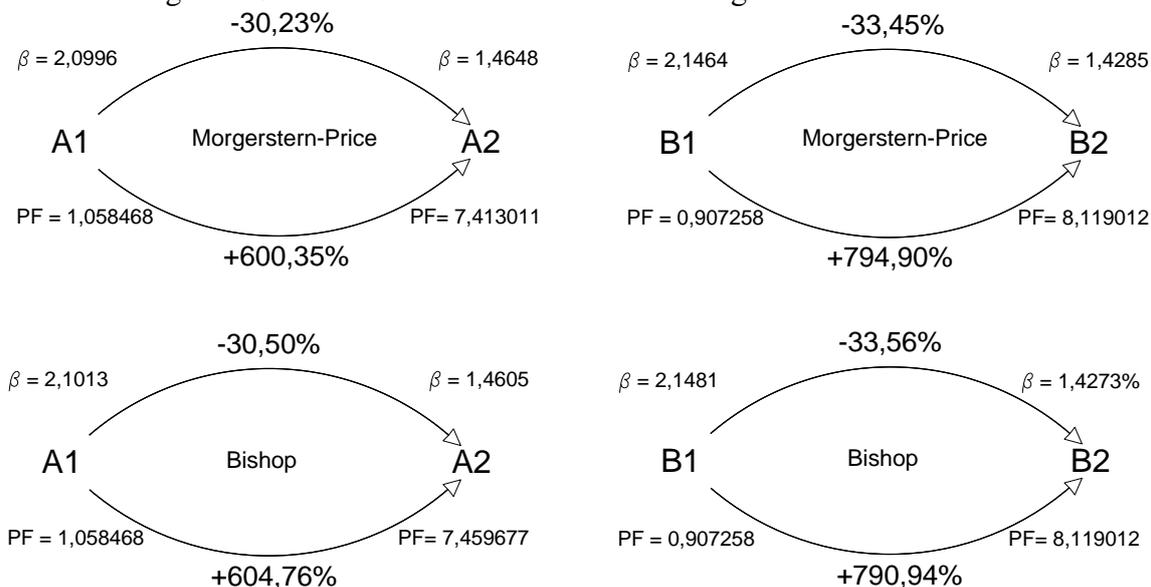
Uma interessante observação feita em ambos os métodos, foi que, apesar dos fatores de segurança médio de A1 serem maiores que B1, as probabilidades de falha deram-se em oposto, com B1 tendo menores probabilidades de falha que A1. Isto vem acompanhado de um maior índice de confiabilidade em todas as análises de B1 em relação a A1, mesmo que em valores muito próximos, esse padrão se confirmou nas duas metodologias. Este fato mostra a independência da PF em relação ao FS.

Os resultados da PF de Monte Carlo também foram todas muito altas, e os β entre pobre e perigoso, segundo Tabela 2.4. Confirma-se, posto agora os resultados de

ambos os métodos probabilísticos, o alto risco de estabilidade do talude, com as probabilidades de falha encontradas ficando muito acima dos padrões apresentados no capítulo 2. Isso pode ser atribuído a alta dependência que o tipo de solo do talude tem da coesão, como visto na Figura 4.4, tratando-se do parâmetro com maiores chances de variação, com o valor do CoV de 40%, 4 vezes maior que do ângulo de atrito e 13 vezes maior que do peso específico.

Fazendo agora a mesma análise da influência da água feita em FOSM, vê-se que, para este método, houve uma maior intervenção, ficando a PF da seção A2 aumentada em 600,35% em relação a A1 e, de B2 para B1, em 794,90% quando utilizado Morgerstern-Price como método determinístico. Com Bishop, esse aumento fica em 604,76% de A1 para A2 e de 794,90% de B1 para B2. E como ocorrido no FOSM, o índice de confiabilidade também ficou em queda quando passava-se a seção saturada. Assim temos uma diminuição de 30,23% de A1 para A2, com Morgerstern-Price, e de 33,45% de B1 para B2. Seguindo-se, para Bishop, essa diminuição ficou em 30,50% de A1 para A2 e de 33,56% de B1 para B2.

Figura 4.8 – Resumo das análises do nível d'água em Monte Carlo.



Fonte: Do autor (2020).

4.4. Influência da sobrecarga de trânsito

Observa-se que a seção B apresentou menores FS em todas as análises determinísticas e em todos os FS médios dos métodos probabilísticos, bem como PF inferiores nas situações de saturação, sendo a seção que apresentou maior probabilidade de falha geral. Logo, a seção B é a de maior criticidade. As análises determinísticas para a seção B com a sobrecarga estão nas Figura 4.9 e Figura 4.10.

Figura 4.9 – Resultados análises determinísticas por Morgenstern-Price com sobrecarga na seção B.

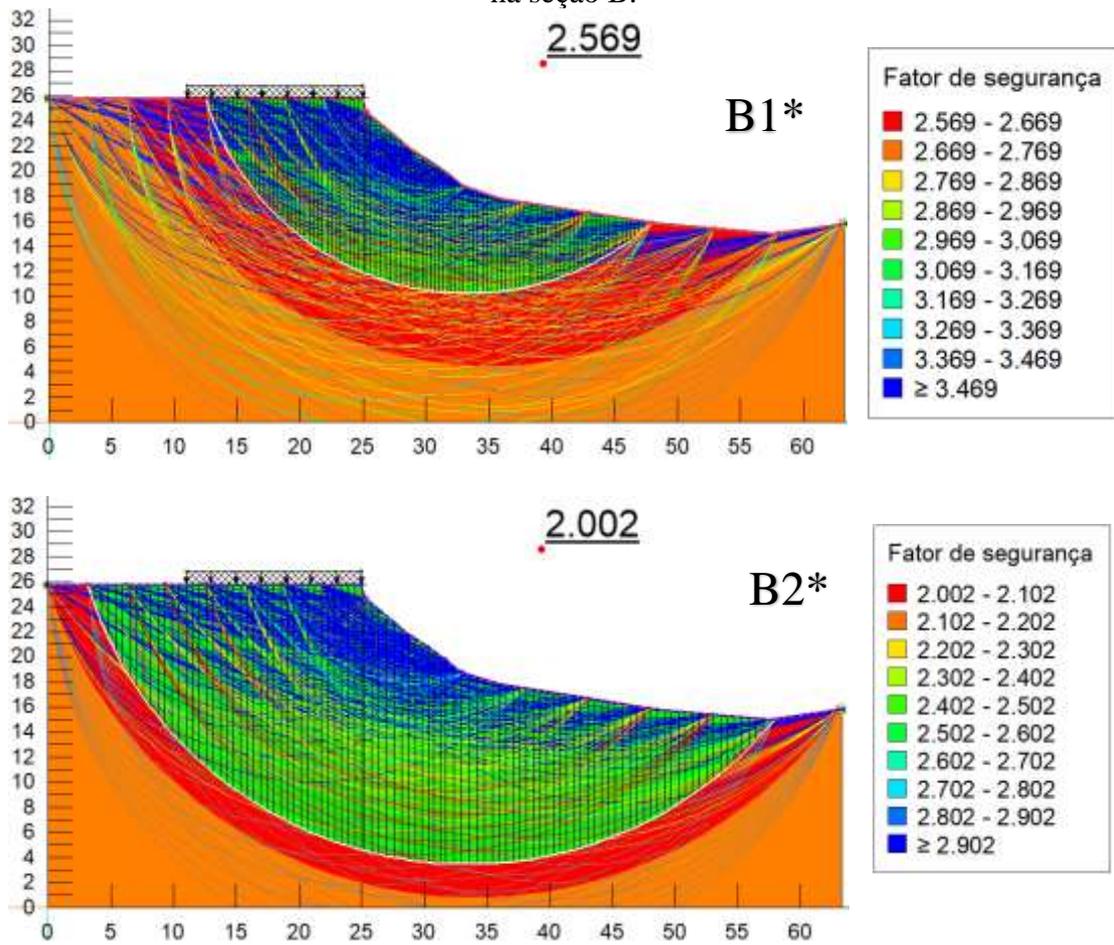
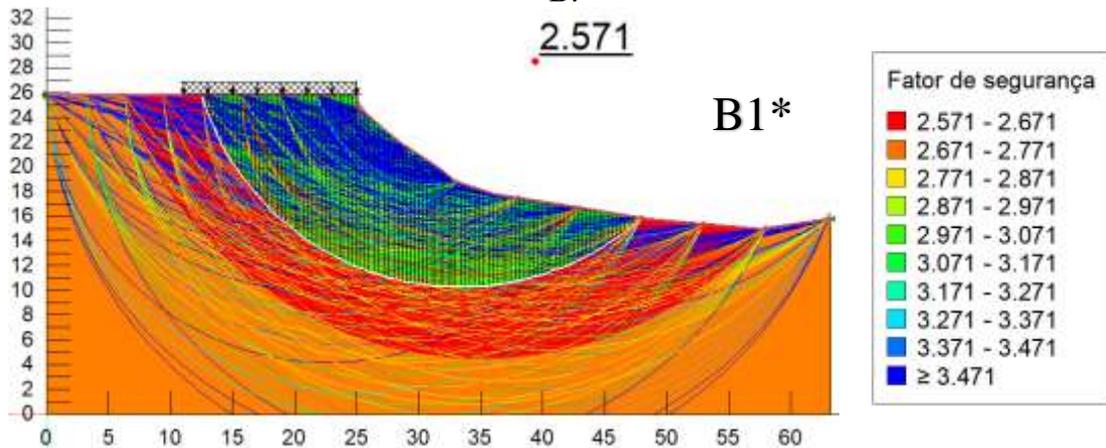
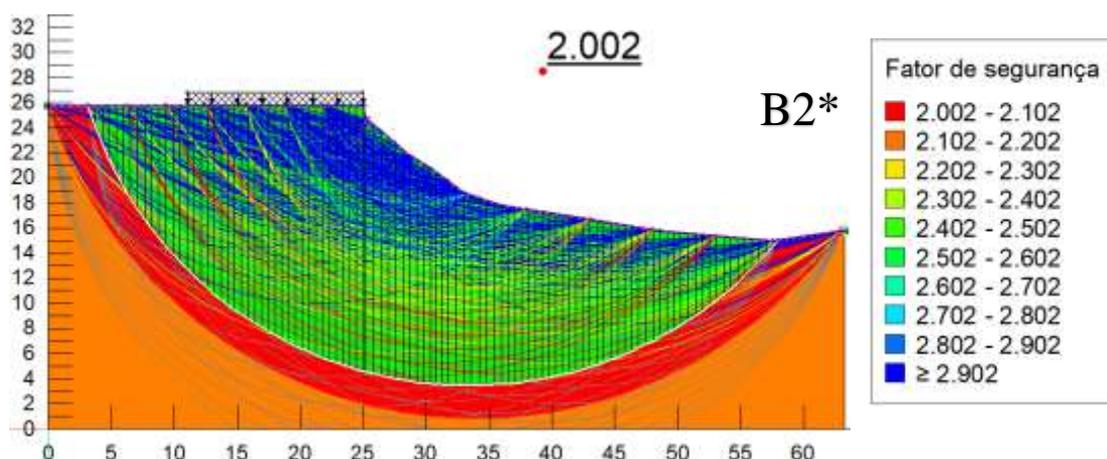


Figura 4.10 – Resultados análises determinísticas por Bishop com sobrecarga na seção B.





Fonte: Do autor (2020).

A Tabela 4.14 contém o resumo dos resultados.

Tabela 4.14 – Resultados determinísticos da seção B com sobrecarga.

Métodos	FS Seção B1	FS Seção B2	FS Seção B1*	FS Seção B2*
Morgerstern-Price	2,706	2,056	2,569	2,002
Bishop	2,707	2,056	2,571	2,002

Fonte: Do autor (2020).

Na análise determinística, pode se observar o impacto gerado pela sobrecarga, materializando-se em uma diminuição do FS de 5,06% e 5,02% (MP e Bishop) na seção B1 e 2,63% para a B2 nos dois métodos.

O cálculo do método probabilístico de FOSM se dá pela mesma forma, com as mesmas interações apontadas na Tabela 4.3. Os valores dos FS das interações estão nas tabelas seguintes, e os resultados gerados no software Slope/W se encontram no Anexo 2.

Tabela 4.15 – Fator de segurança das interações por Morgenstern-Price para seção B com sobrecarga.

Seções	FS 1º interação	FS 2º interação	FS 3º interação	FS 4º interação
B1	2,706	2,776	2,907	2,523
B2	2,056	2,073	2,244	1,947
B1*	2,569	2,626	2,769	2,400
B2*	2,002	2,019	2,184	1,898

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.16 – Fator de segurança das interações por Bishop para seção B com sobrecarga.

Seções	FS 1° interação	FS 2° interação	FS 3° interação	FS 4° interação
B1	2,707	2,778	2,909	2,525
B2	2,056	2,073	2,244	1,947
B1*	2,571	2,628	2,771	2,401
B2*	2,002	2,019	2,185	1,898

Fonte: Do autor (2020).

Na sequência, é apresentado o cálculo dos valores da variância dos FS pelas tabelas Tabela 4.17 e Tabela 4.18.

Tabela 4.17 – Sequência de cálculo de V[FS] por Morgenstern-Price com sobrecarga.

Seção	Parâmetro	δFS_i	S	V(X _i)	$\left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V(X_i)$
B1	Ângulo atrito	-0,07	0,78	0,6084	0,0049
	Coesão	-0,201	16,956	287,5059	0,6464
	Peso específico	0,183	0,3795	0,14402	0,0030
B2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,189	16,956	287,5059	0,5655
	Peso específico	0,109	0,3795	0,14402	0,0011
B1*	Ângulo atrito	-0,057	0,78	0,6084	0,0032
	Coesão	-0,200	16,956	287,5059	0,6400
	Peso específico	0,169	0,3795	0,14402	0,0026
B2*	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,182	16,956	287,5059	0,5300
	Peso específico	0,104	0,3795	0,14402	0,0010

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.18 – Sequência de cálculo de V[FS] por Bishop com sobrecarga.

Seção	Parâmetro	δFS_i	S	V(X _i)	$\left(\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}\right)^2 V(X_i)$
B1	Ângulo atrito	-0,071	0,78	0,6084	0,0050
	Coesão	-0,202	16,956	287,5059	0,6529
	Peso específico	0,182	0,3795	0,14402	0,0030
B2	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,188	16,956	287,5059	0,5655
	Peso específico	0,109	0,3795	0,14402	0,0011
B1*	Ângulo atrito	-0,057	0,78	0,6084	0,0032
	Coesão	-0,200	16,956	287,5059	0,6400
	Peso específico	0,170	0,3795	0,14402	0,0026
B2*	Ângulo atrito	-0,017	0,78	0,6084	0,0003
	Coesão	-0,183	16,956	287,5059	0,5358
	Peso específico	0,104	0,3795	0,14402	0,0010

Fonte: Do autor (2020).

Os resultados são mostrados nas tabelas a seguir.

Tabela 4.19 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade por Morgenstern-Price com sobrecarga.

Seção	V(FS)	PF (%)	β
B1	0,6543	1,7471	2,1090
B2	0,5669	8,0372	1,4026
B1*	0,6458	2,5446	1,9524
B2*	0,5312	8,4606	1,3747

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.20 – Resultados de variância, probabilidade de falha e índice de confiabilidade por Bishop com sobrecarga.

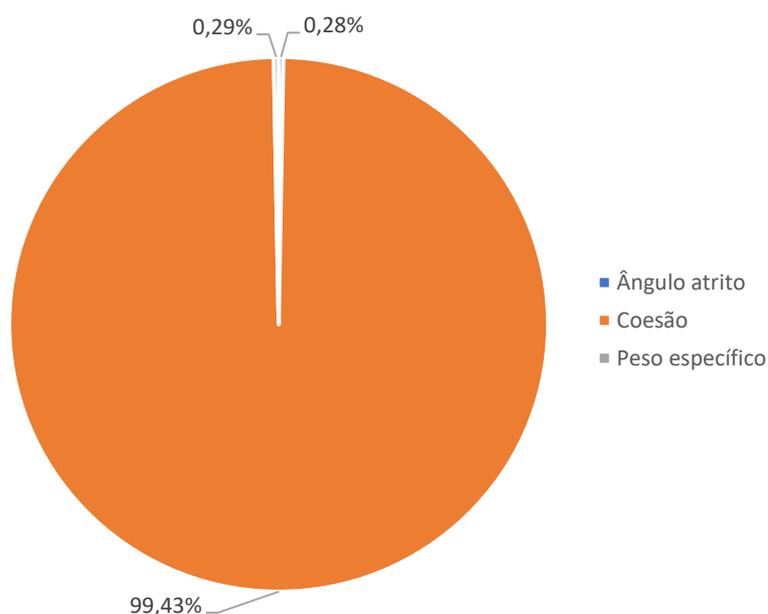
Seção	V(FS)	PF (%)	β
B1	0,6609	1,7875	2,0998
B2	0,5669	8,0372	1,4026
B1*	0,6458	2,5301	1,9548
B2*	0,5371	8,5775	1,3672

Fonte: Do autor (2020).

Em FOSM, vê-se o aumento da PF e a diminuição do β desencadeado pela sobrecarga. Mais além, houve uma diferença bem mais profunda na seção seca do que na saturada, refletidas em um aumento de 45,65% e 41,54% (MP e Bishop) na seção B1 e apenas de 5,27% e 6,72% (MP e Bishop) na B2. Os índices de confiabilidade caíram 7,43% e 6,91% (MP e Bishop) em B1 e 1,99% e 2,52% em B2.

Seguindo os mesmos passos das análises sem a sobrecarga, tem-se agora a influência das variáveis por meio da Figura 4.11. Como os valores foram os mesmos para os dois métodos determinísticos, simplificou-se em apenas um gráfico.

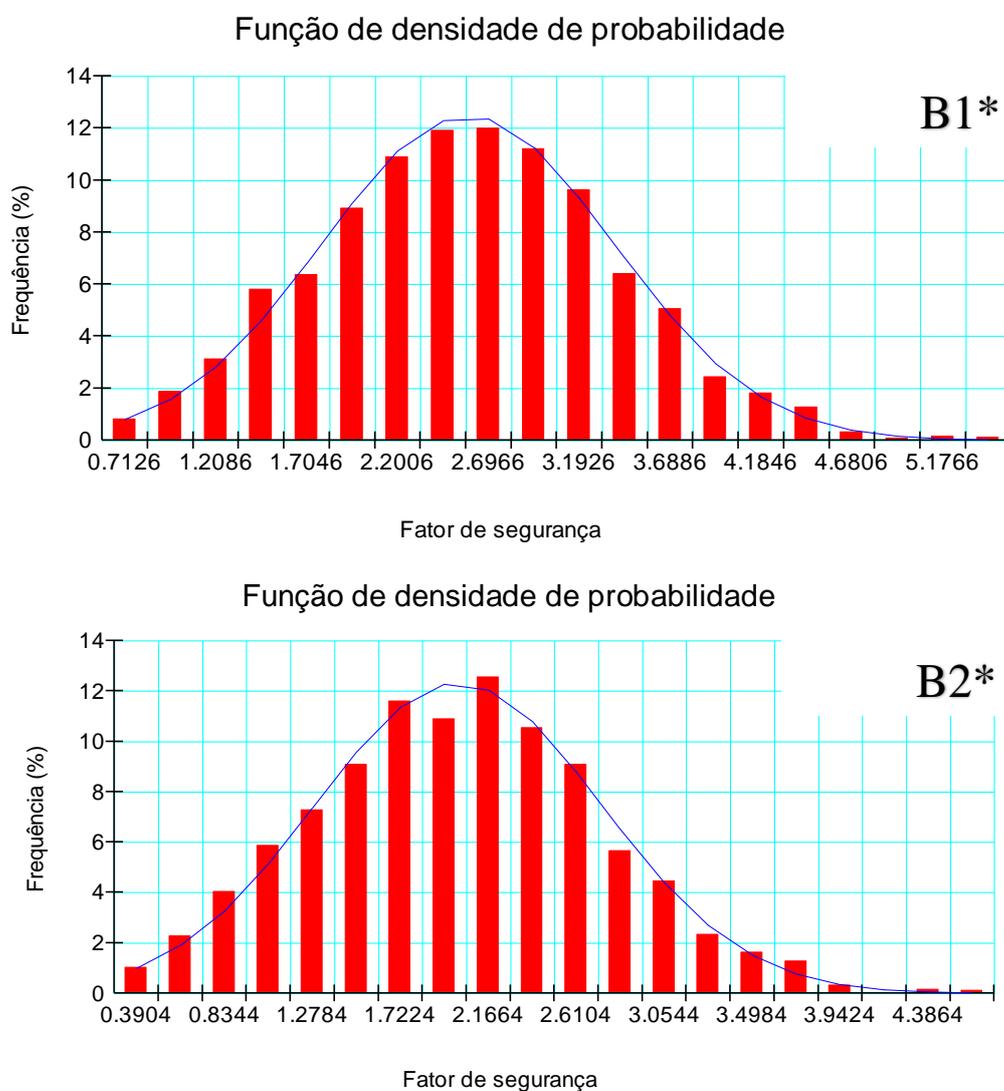
Figura 4.11 – Influência dos parâmetros para seção B com sobrecarga.



Fonte: Do autor (2020).

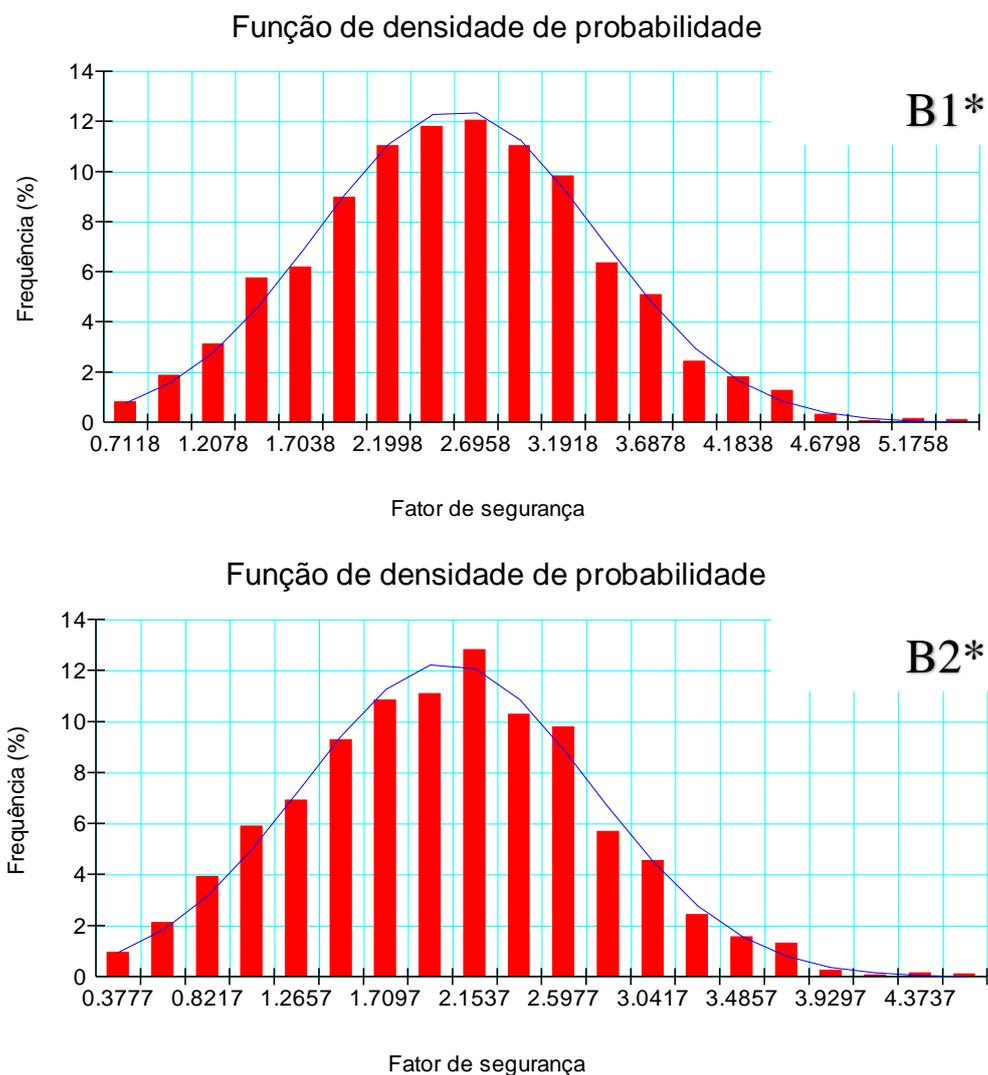
A sobrecarga configurou uma coesão ainda mais influente, mantendo-se assim a consideração de única variável aleatória em Monte Carlo, que tem seus resultados apresentados na sequência. A variação da coesão continua como na Figura 4.5.

Figura 4.12 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Mogenstern-Price: B1 e B2 com sobrecarga.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 4.13 – Função densidade de probabilidade de Monte Carlo por Bishop: B1 e B2 com sobrecarga.



Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.21 – Resultados de Monte Carlo por Morgenstern-Price com sobrecarga.

Seção	FS médio	S	PF (%)	β
B1	2,7174	0,80015	0,907258	2,1464
B2	2,0679	0,74757	8,119012	1,4285
B1*	2,5819	0,79767	2,116935	1,9832
B2*	2,0135	0,72465	8,522441	1,3986

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4.22 – Resultados de Monte Carlo por Bishop com sobrecarga.

Seção	FS médio	S	PF (%)	β
B1	2,7188	0,80013	0,907258	2,1481
B2	2,0678	0,74811	8,119012	1,4273
B1*	2,5836	0,79766	2,116935	1,9854
B2*	2,0133	0,72518	8,522441	1,3973

Fonte: Do autor (2020).

A sobrecarga causou em Monte Carlo uma aproximação com o FOSM na seção seca, onde haviam tido maiores divergências nas análises sem a sobrecarga, passando de 51,93% e 50,76% (Tabela 4.12 e Tabela 4.13) para 83,19% e 83,67%, na utilização de Morgenstern-Price e Bishop consecutivamente. O aumento obtido na probabilidade de falha, foi então, de 133,33% na seção B1 e de 4,97% para a seção B2, em ambos os determinísticos, seguindo o mesmo padrão de maior aumento na seção seca visto em FOSM. O β teve diminuição de 7,60% e 7,57% (MP e Bishop) em B1 e de 2,09% e 2,10% para B2.

5 CONCLUSÕES

Foi analisada a estabilidade de duas seções distintas de um talude na cidade de Lavras/MG, que apresentava sinais de movimentação, em condições seca e saturada. Foram utilizados dois métodos determinísticos para tal, Morgenstern-Price e Bishop, e dois métodos probabilísticos, sendo os métodos *First Order Second Moment* (FOSM) e Monte Carlo.

Posto todas as resoluções, ressalta-se proximidades nos resultados dos dois métodos probabilísticos utilizados, com mais de 97% de aproximação nas seções úmidas, mais de 83% de aproximação em todas as seções com a presença de sobrecarga e acima de 50% nas seções secas sem sobrecarga, configurando-se como um ponto de maior diferença. Isso demonstra a assertividade nos cálculos. Este trabalho mostra que mesmo com o resultado determinístico estando dentro do seguro ($FS > 1,5$), tem-se uma probabilidade de falha muito alta, sendo todas as probabilidades encontradas muito acima do nível perigoso de 0,16% segundo USACE (1999), em que os valores obtidos de PF variaram entre 467,04% e 5260,94% acima do valor comparado, servindo como alerta para análises uni metodológicas.

Os dois métodos determinísticos utilizados foram de grande aproximação, não verificando qualquer indício de diminuição do índice de confiança em relação a rigorosidade do método.

O nível da água teve forte influência na PF, acrescentando cerca de 5,86% em todos os casos, mas retornou, em média, índices de confiabilidade subtraídos de 0,67.

Também se registrou grande impacto de sobrecargas, com acréscimos na PF entre 0,74% e 1,21% na seção seca e cerca de 0,44% na seção úmida, chamando atenção para um maior aumento em áreas secas. O β também foi atingido, sendo subtraídos de seu valor cerca de 0,157 na seção seca e 0,031 na seção úmida.

O trabalho também valida a fotogrametria digital como um meio eficiente, de rapidez e precisão, no levantamento das características topográficas de taludes, potencializado por softwares com grandes ferramentas de retirada de informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, Lee W. et al. Slope stability and stabilization methods. John Wiley & Sons, 2001.

Agência Nacional de Águas (ANA), HIDROWEB, www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao, acessado em outubro de 2020.

AMARAL, É. D. Análise probabilística de barragens de terra construídas com materiais de baixa qualidade. 2011. xviii, 130 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

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

ASSIS, A.P., ESPÓSITO, T.J., GARDONI, M.G., SILVA, P.D.E.A. & J.A. MAIA (2012). Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. Publicação G.AP-002/2012. Apostila do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, UNB, Brasília. 2012.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, 1955.

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight. CRC Press, 2014.

COELHO, L. BRITO, J. N. Fotogrametria digital. Rio de Janeiro-RJ: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.

CRESTANI, B. **Análise probabilística do Fator de Segurança de taludes através do método de Monte Carlo**. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis. 2018.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslides types and processes**. Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences. 1996.

DUNCAN, J. M. **State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes**. Journal of Geotechnical engineering, v. 122, n. 7, p. 577-596, 1996.

EINSTEIN, H. H.; BAECHER, G. B. **Probabilistic and statistical methods in engineering geology I. Problem statement and introduction to solution**. In: Ingenieurgeologie und Geomechanik als Grundlagen des Felsbaues/Engineering Geology and Geomechanics as Fundamentals of Rock Engineering. Springer, Vienna, 1982.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FREITAS, M. A. C. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. 2011. Dissertação de mestrado - Especialização em Geotecnia, Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Portugal. 2011.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

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

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.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blucher. 1983.

HARR, M. E. **Reliability- Based Design in Civil Engineering**. McGraw-Hill, Inc., U.S.A. 1987.

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

HUTCHINSON, J. N. **Mass movement**. In: Encyclopedia of Geomorphology. Nova York: Fairbridge Reinhold Book. 1968.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional por amostra de domicílio (PNAD): 2019**. Rio de Janeiro, 2020.

JESUS, L. G. S. **Análise probabilística de estabilidade de taludes de barragens de terra**. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília – UnB, Brasília-DF, 2015.

MINICH, A. M.; LIMA, C. E.; HARTMANN, D. A.; LINHARES, R. M. **Aplicação da fotogrametria digital para obtenção de modelo virtual tridimensional da ponte natural de pedra de Alegrete/RS**. Seminário de engenharia geotecnia do Rio Grande do Sul. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria -RS, 2019.

MORALES, M. S. T. **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas-não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. W. **The analysis of the stability of general slip surfaces**. Géotechnique, v. 15, n. 1, 1965.

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.

SANDOVAL, M. A. P. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes**. 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

SILVA, B. M. F. **Análise probabilística de estabilidade de falésias no litoral do RN**. 2019. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal-RN, 2019.

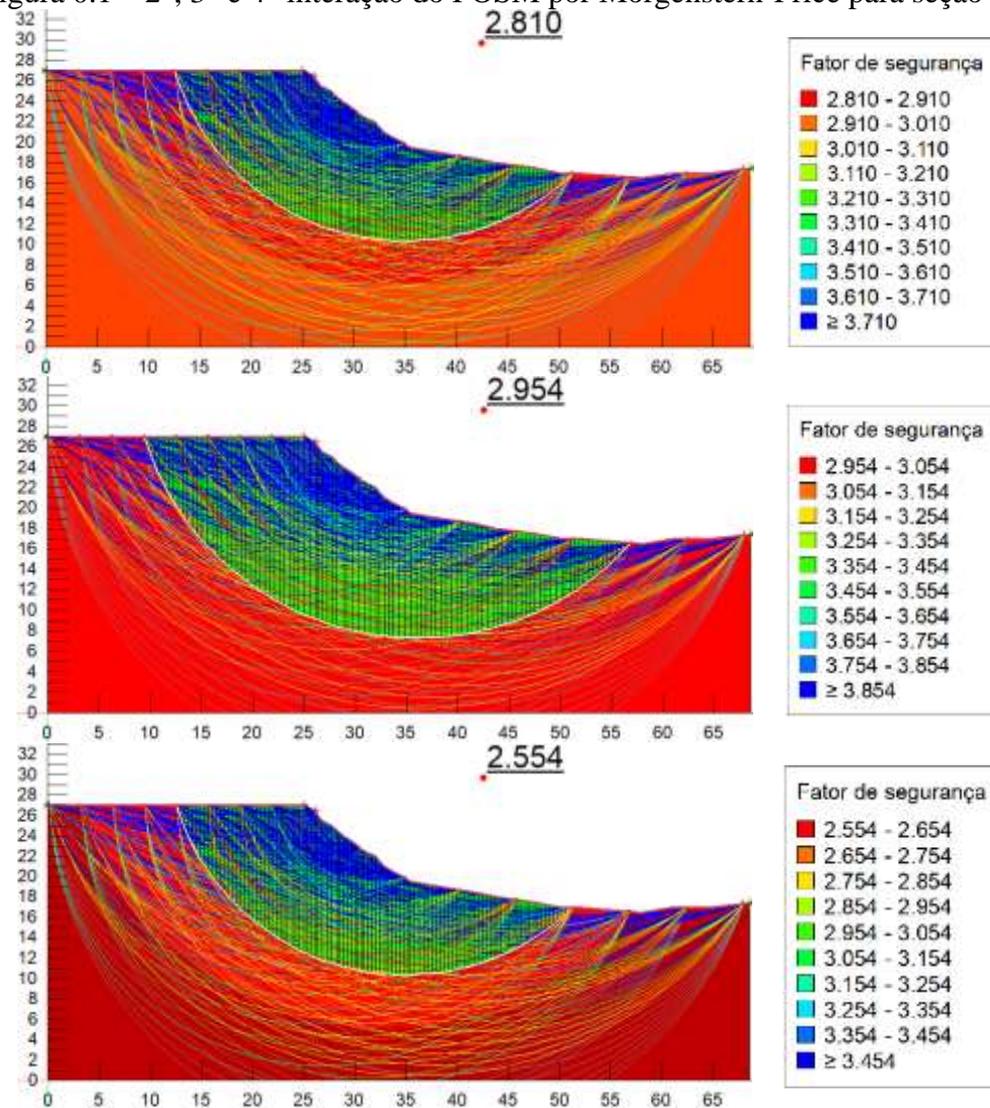
SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. Dissertação (Mestrado em engenharia geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2015.

SILVA, D. L. **Estudo comparativo entre análises probabilísticas e determinísticas de estabilidade de talude de um depósito de resíduos de mineração**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2019.

- 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, 2018.
- SILVA, M. A. **Caracterização Geológico-geotécnica e Análise de Estabilidade de Uma Encosta na BR-376 - Serra do Mar Paranaense**. Dissertação (Mestrado em engenharia de construção civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2019.
- SILVEIRA, C. T. D.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; FELIPE, R. D. S.; FILHO, J. L. K.; FOLADOR, R. M.; COSTA, L. C. **Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na Bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 13, n. 3, 2012.
- SOARES, P. M. C. **Busca da superfície de ruptura crítica da análise tridimensional de estabilidade de taludes**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás-UFG, Goiânia-GO, 2010.
- SPENCER, E. **A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces**. 1967.
- U.S.A.C.E. **Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies**. U.S. Army Corps of Engineers, 1999.
- VARNES, D. J. **Landslides types and processes**. In: EKEL, E. B. (Org.) Landslides and engineering practice. Washington: National Academy of Sciences. Cap. 2. 1958.
- VARNES, D. J. **Landslides, analysis and control**. Special Report 176, National Academy of Sciences, Cap. II. 1978.
- VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. 2018. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Pontifícia Universidade Católica-PUC, Rio de Janeiro-RJ, 2018.
- WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, j.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. **‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications**. Geomorphology, 2012.
- ZANARDO, B. F. **Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mina de Bauxita**. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL, Poços de Caldas – MG, 2014.

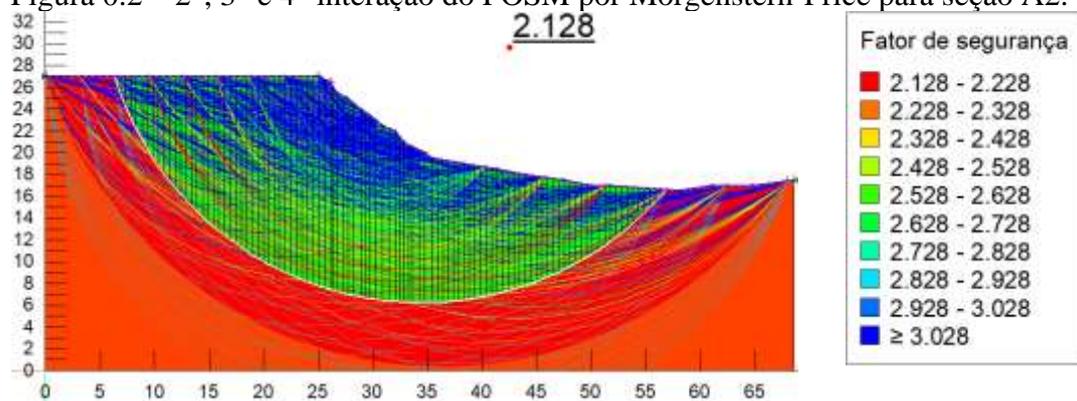
ANEXO 1

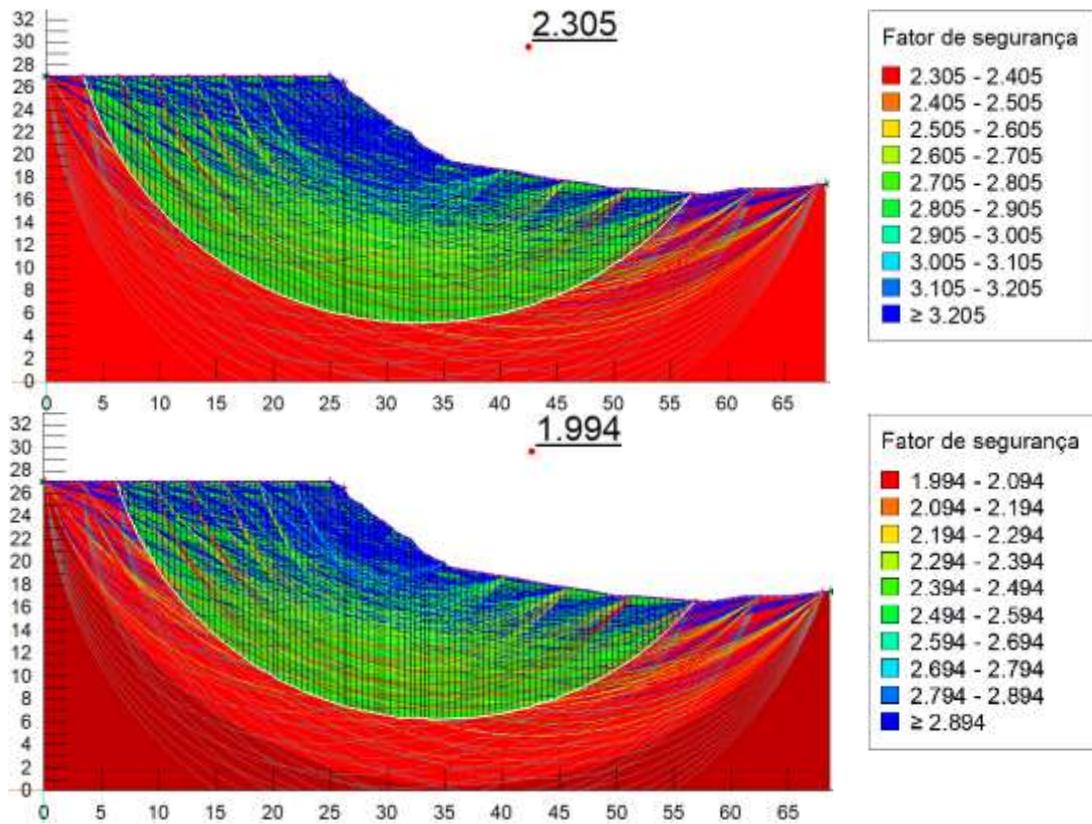
Figura 0.1 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção A1.



Fonte: Do autor (2020).

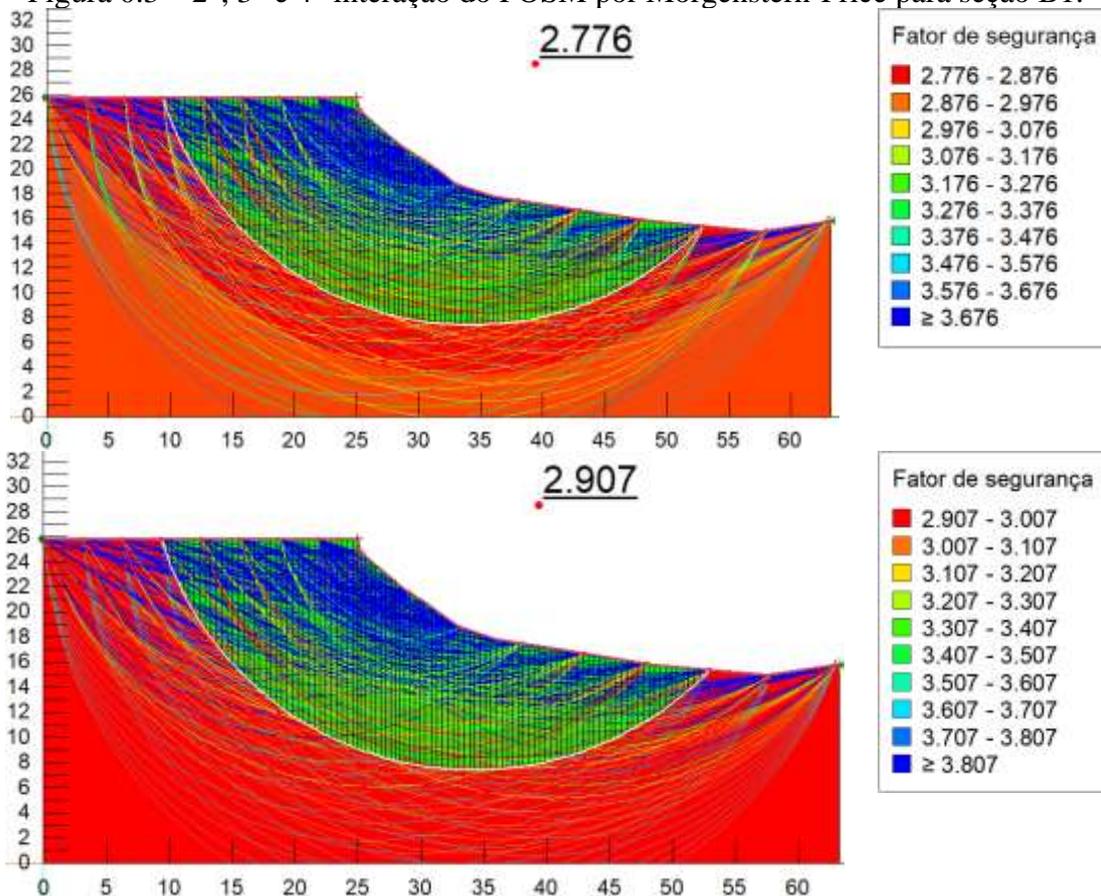
Figura 0.2 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção A2.

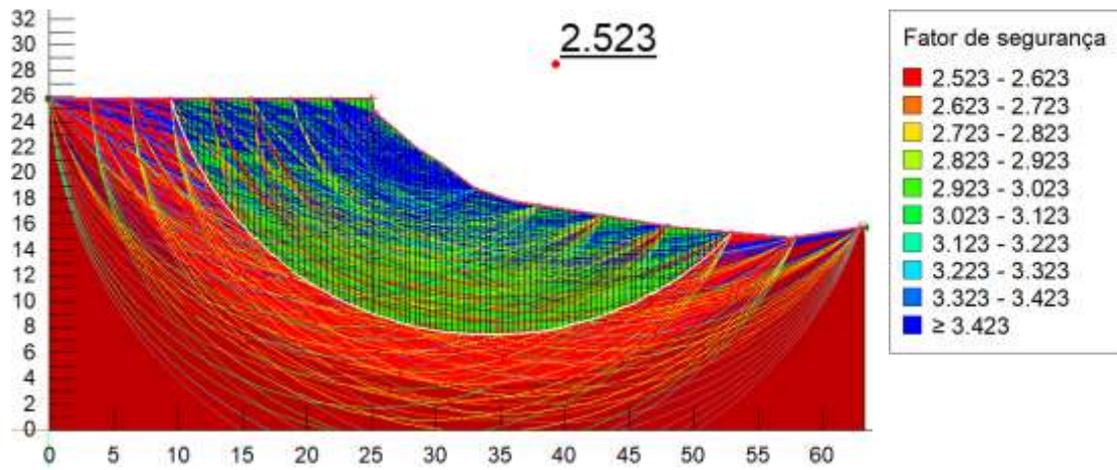




Fonte: Do autor (2020).

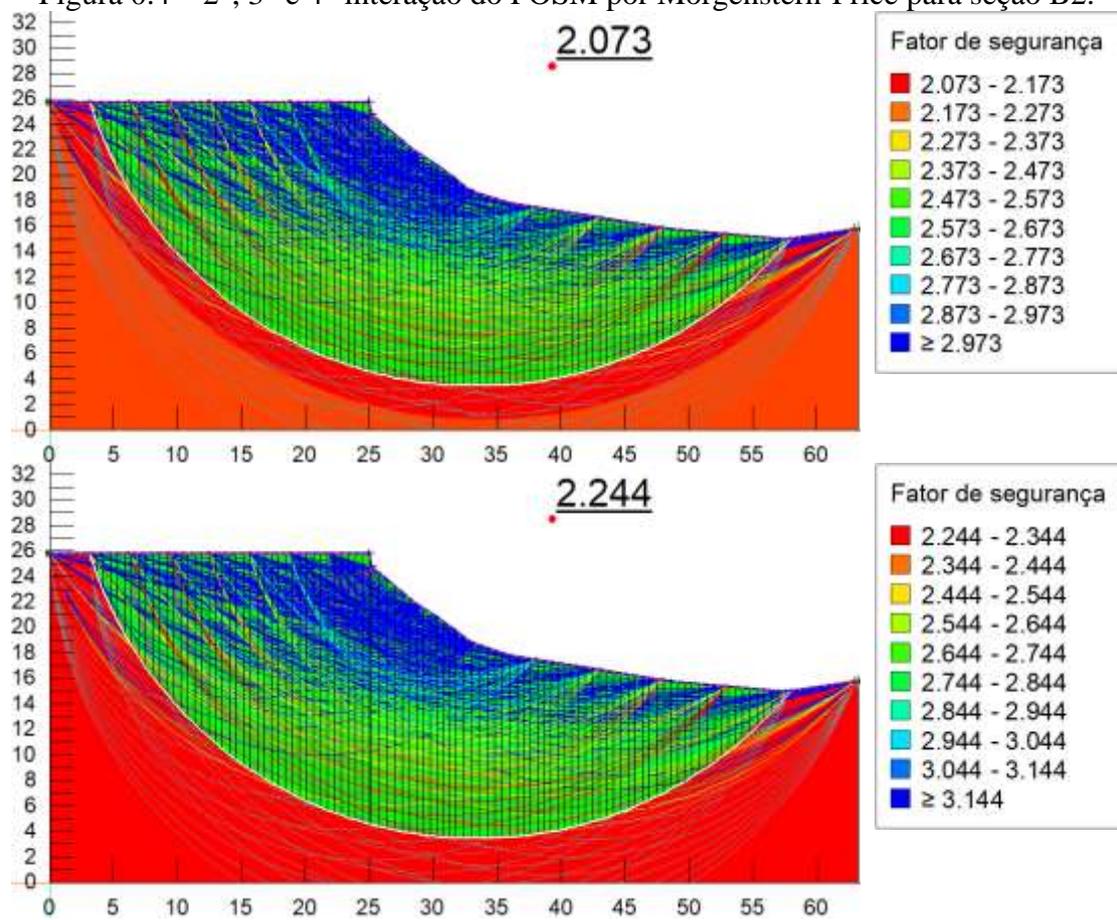
Figura 0.3 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção B1.

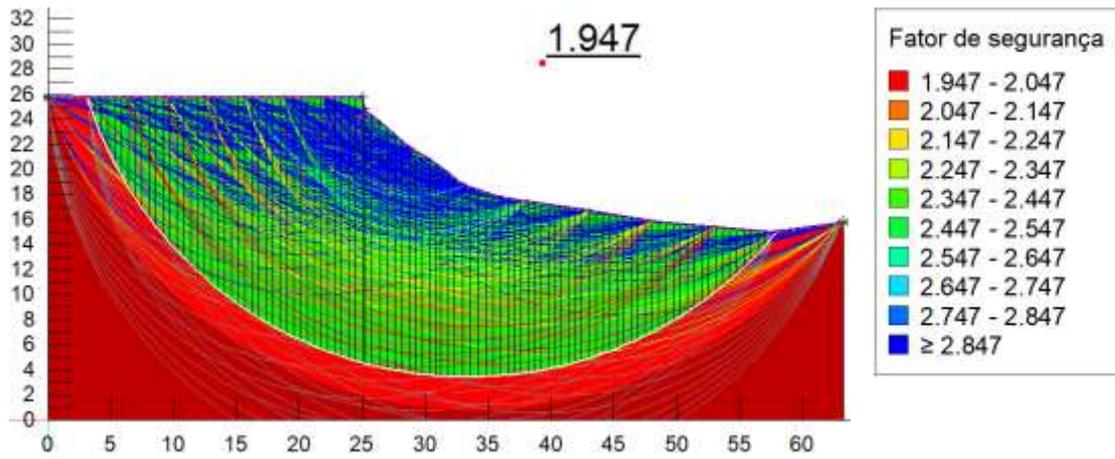




Fonte: Do autor (2020).

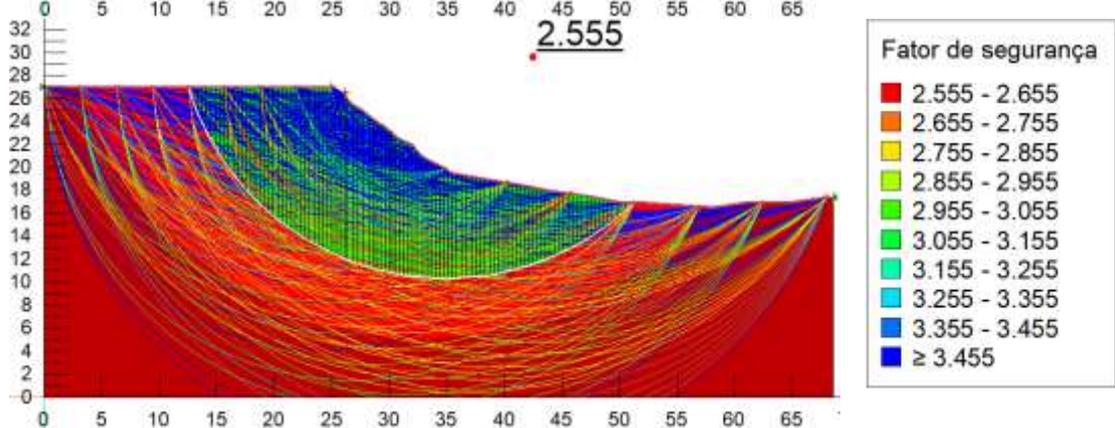
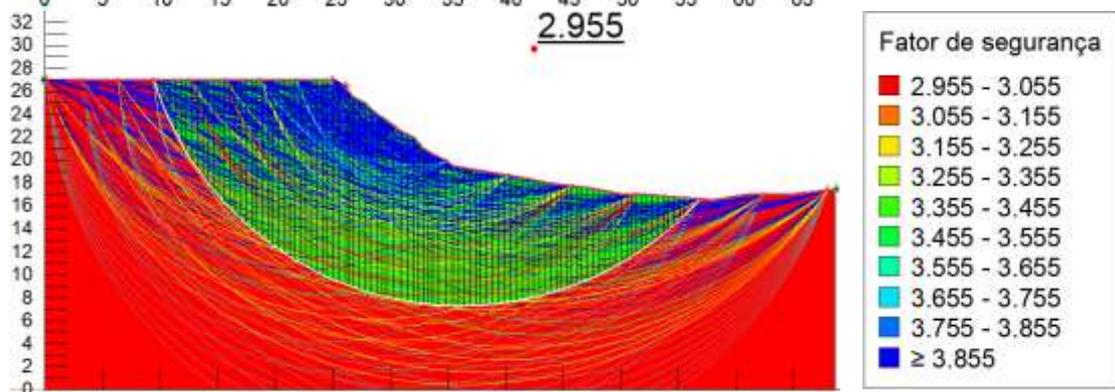
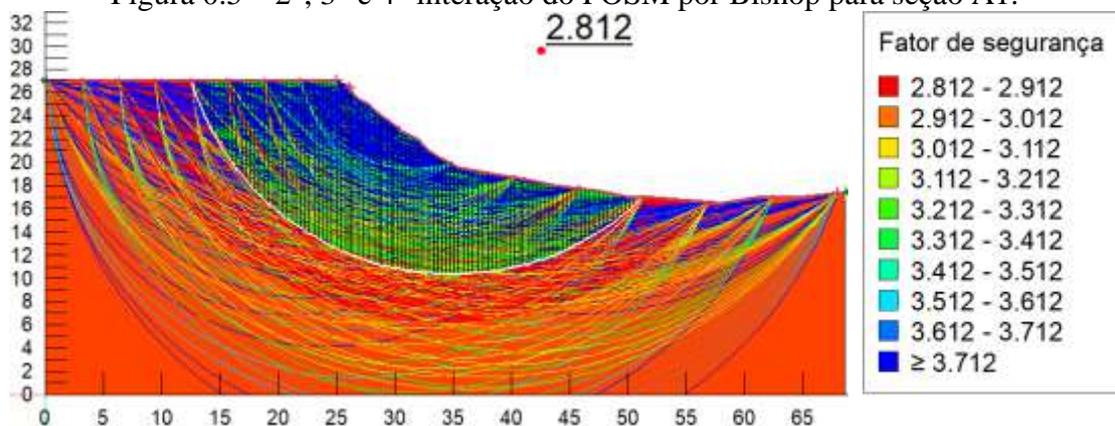
Figura 0.4 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Morgenstern-Price para seção B2.





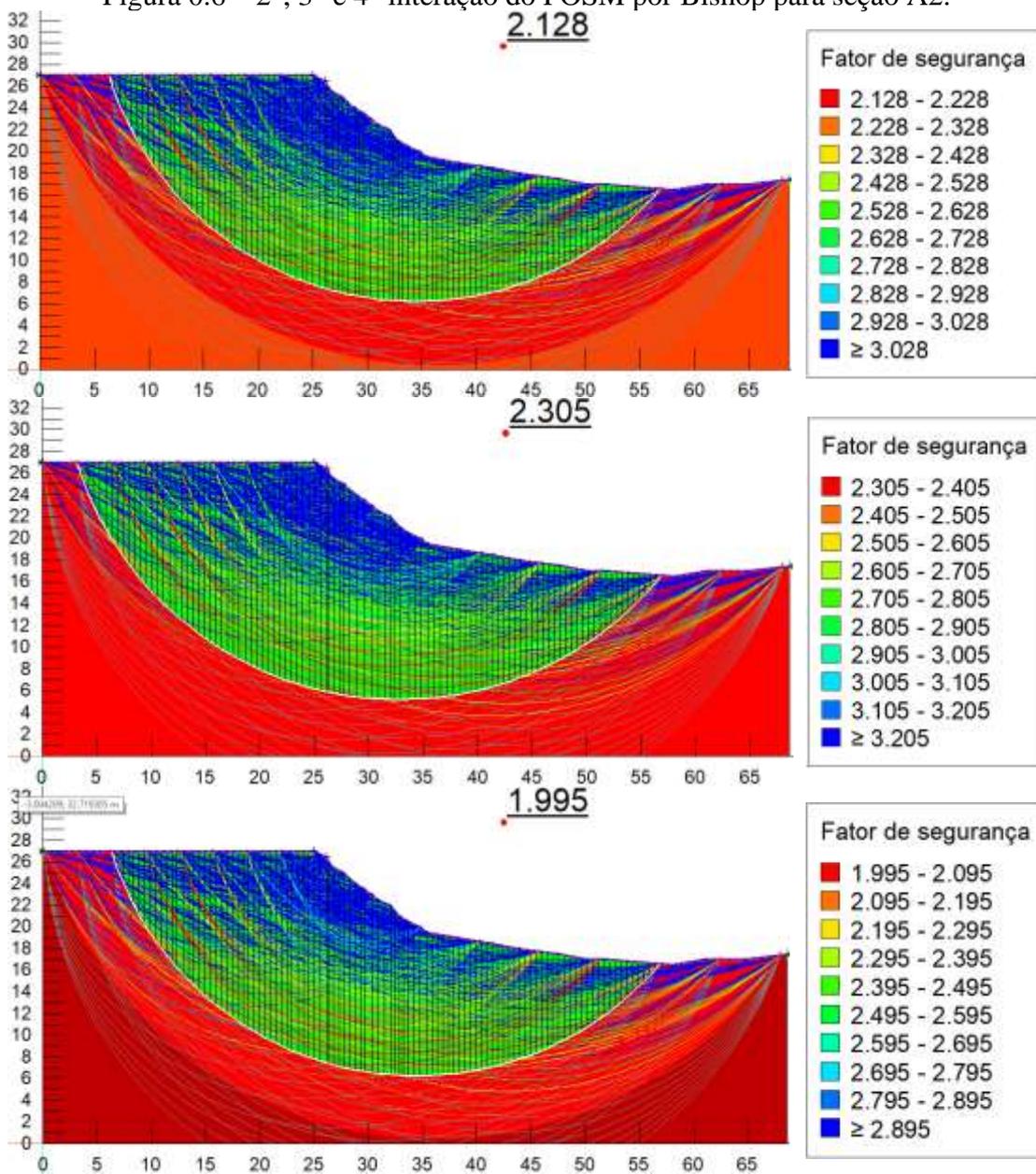
Fonte: Do autor (2020).

Figura 0.5 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção A1.



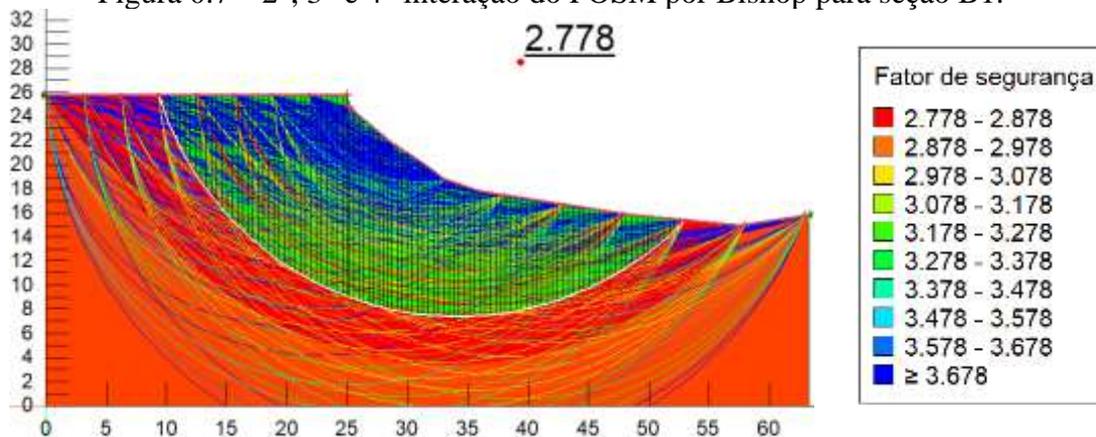
Fonte: Do autor (2020).

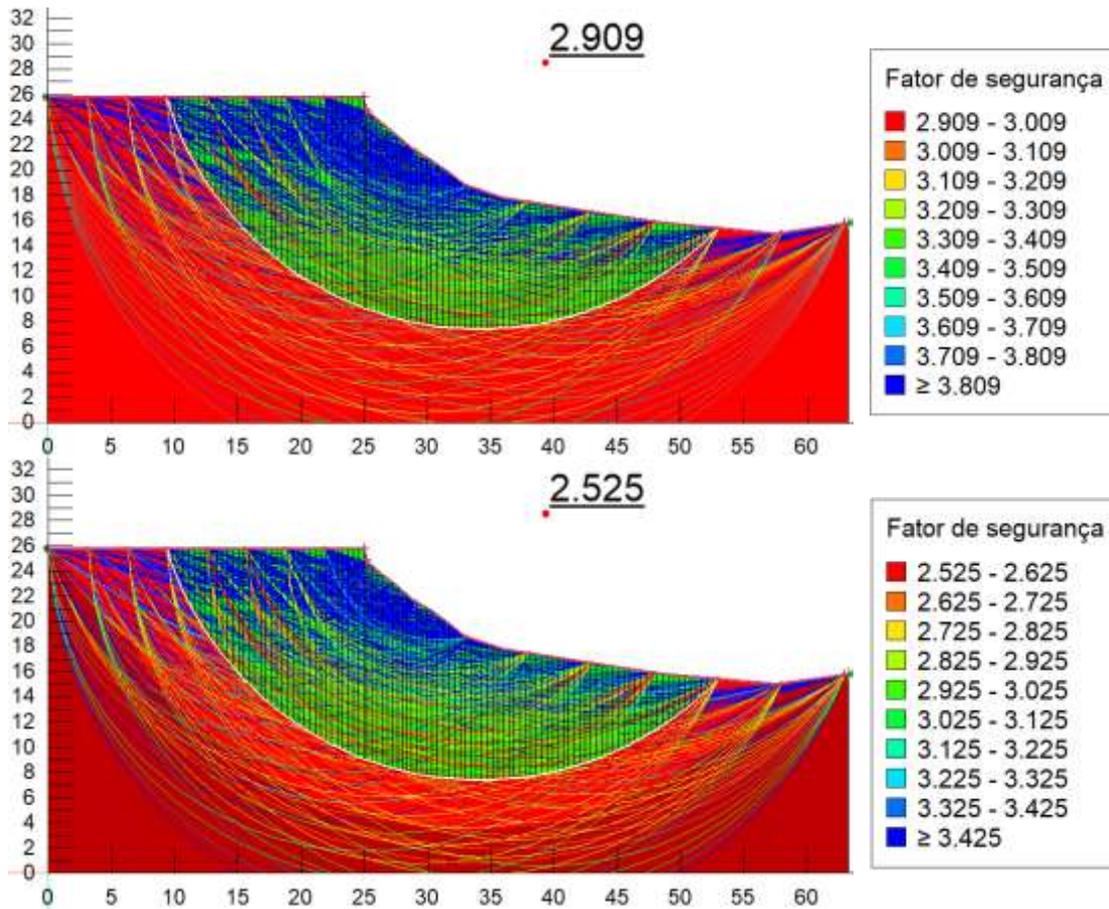
Figura 0.6 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção A2.



Fonte: Do autor (2020).

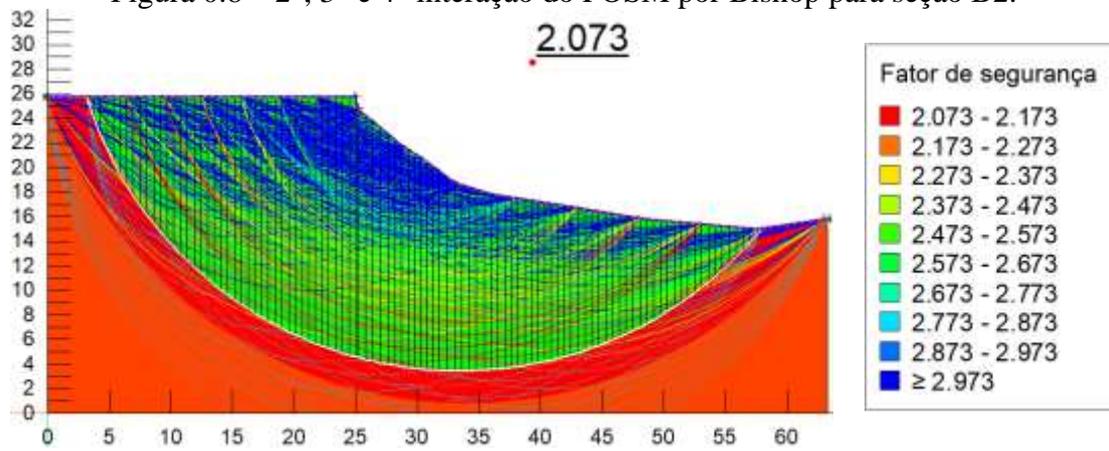
Figura 0.7 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção B1.

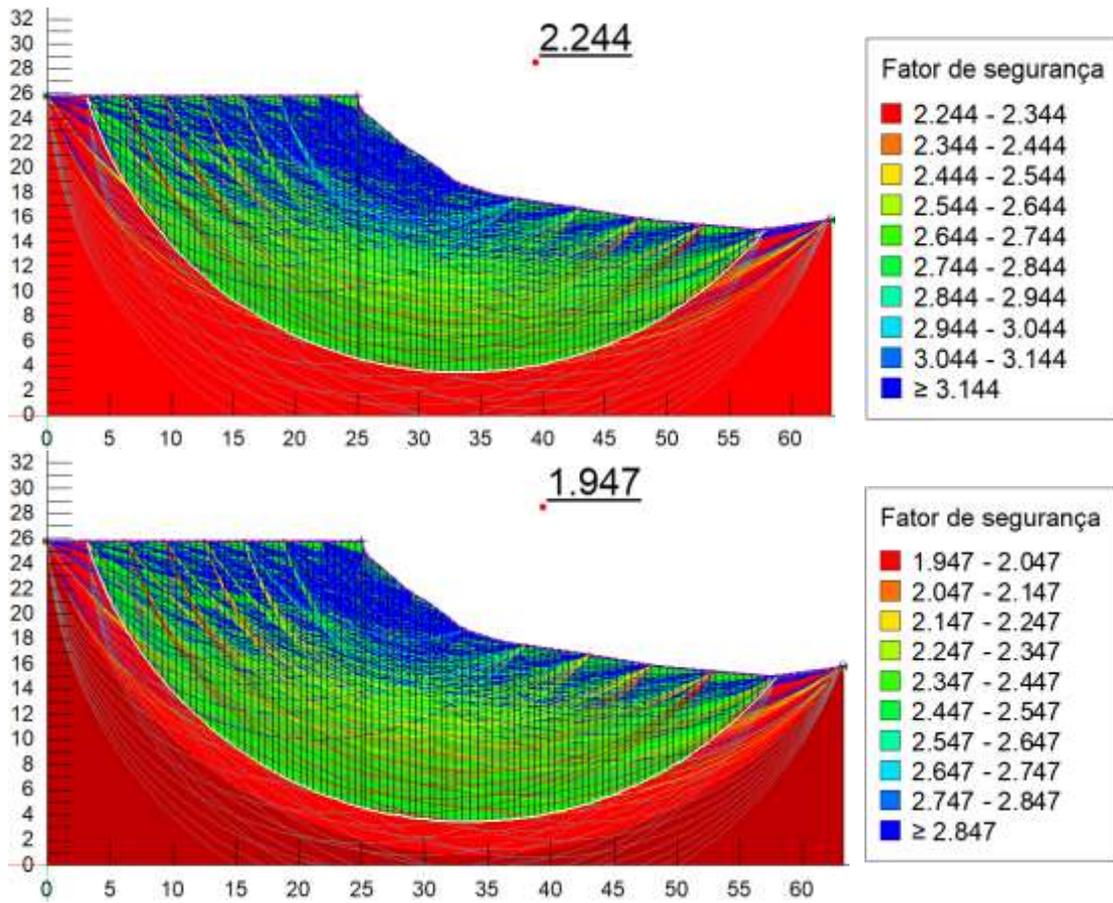




Fonte: Do autor (2020).

Figura 0.8 – 2°, 3° e 4° interação do FOSM por Bishop para seção B2.

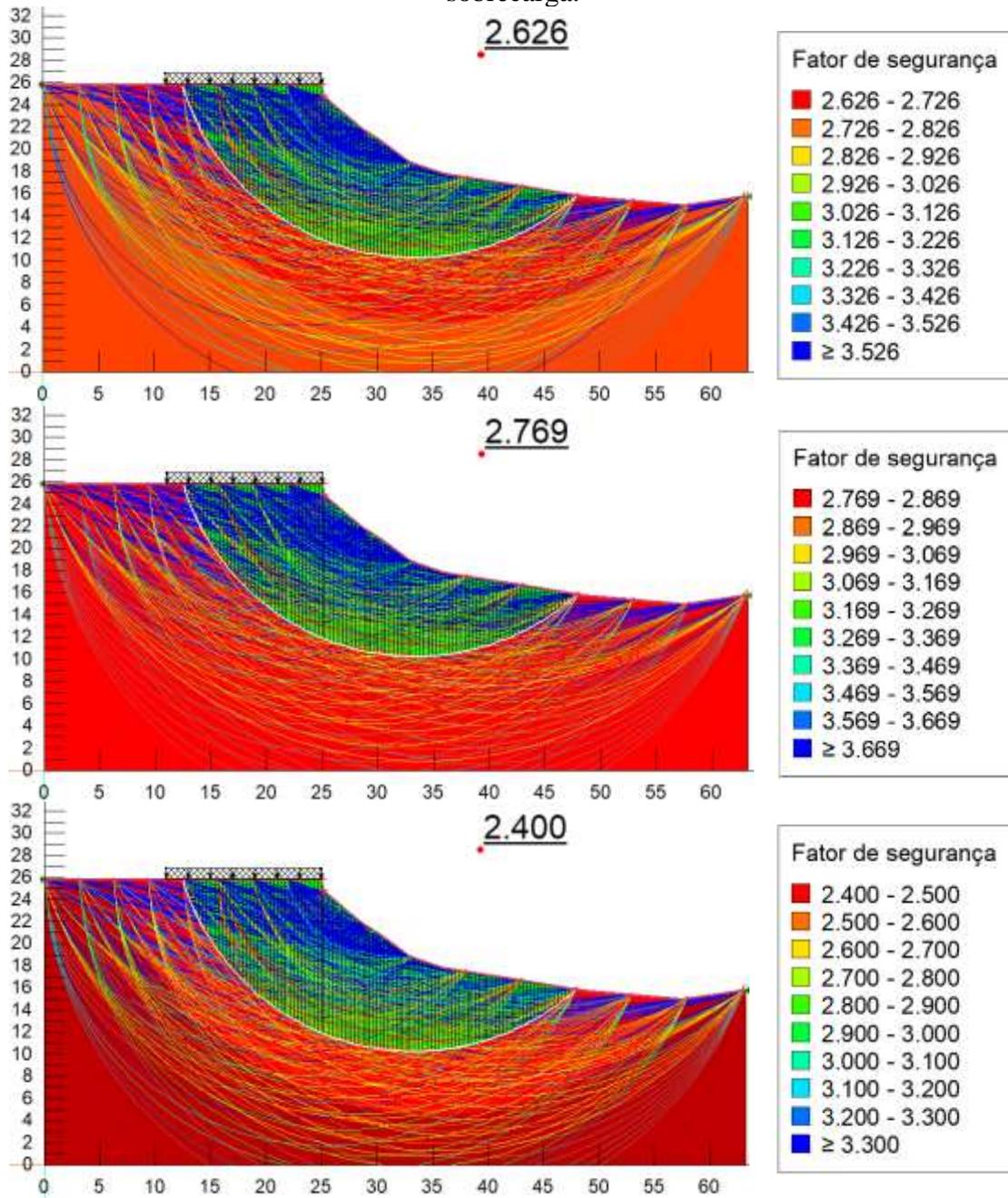




Fonte: Do autor (2020).

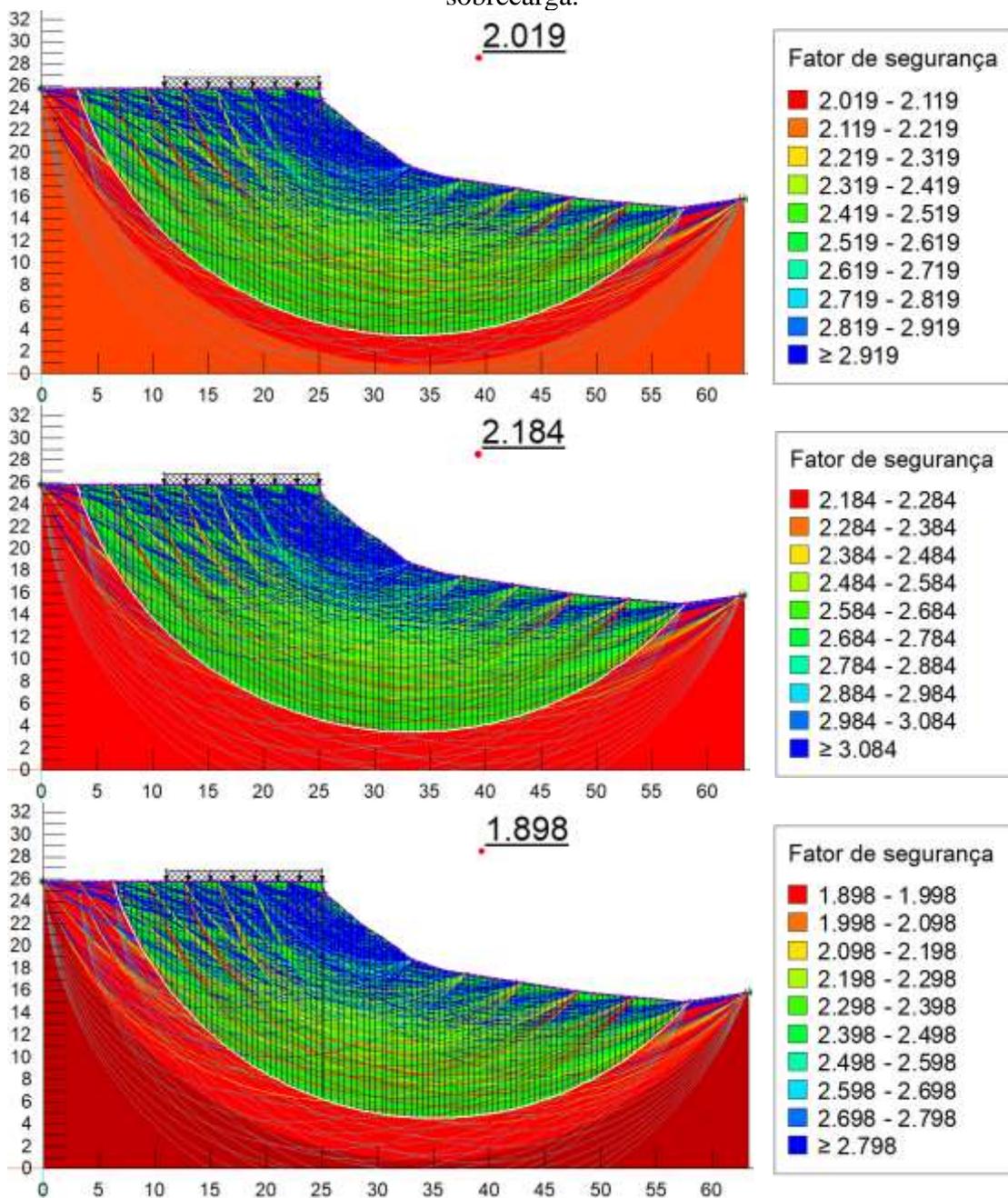
ANEXO 2

Figura 0.1 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Morgenstern-Price para seção B1 com sobrecarga.



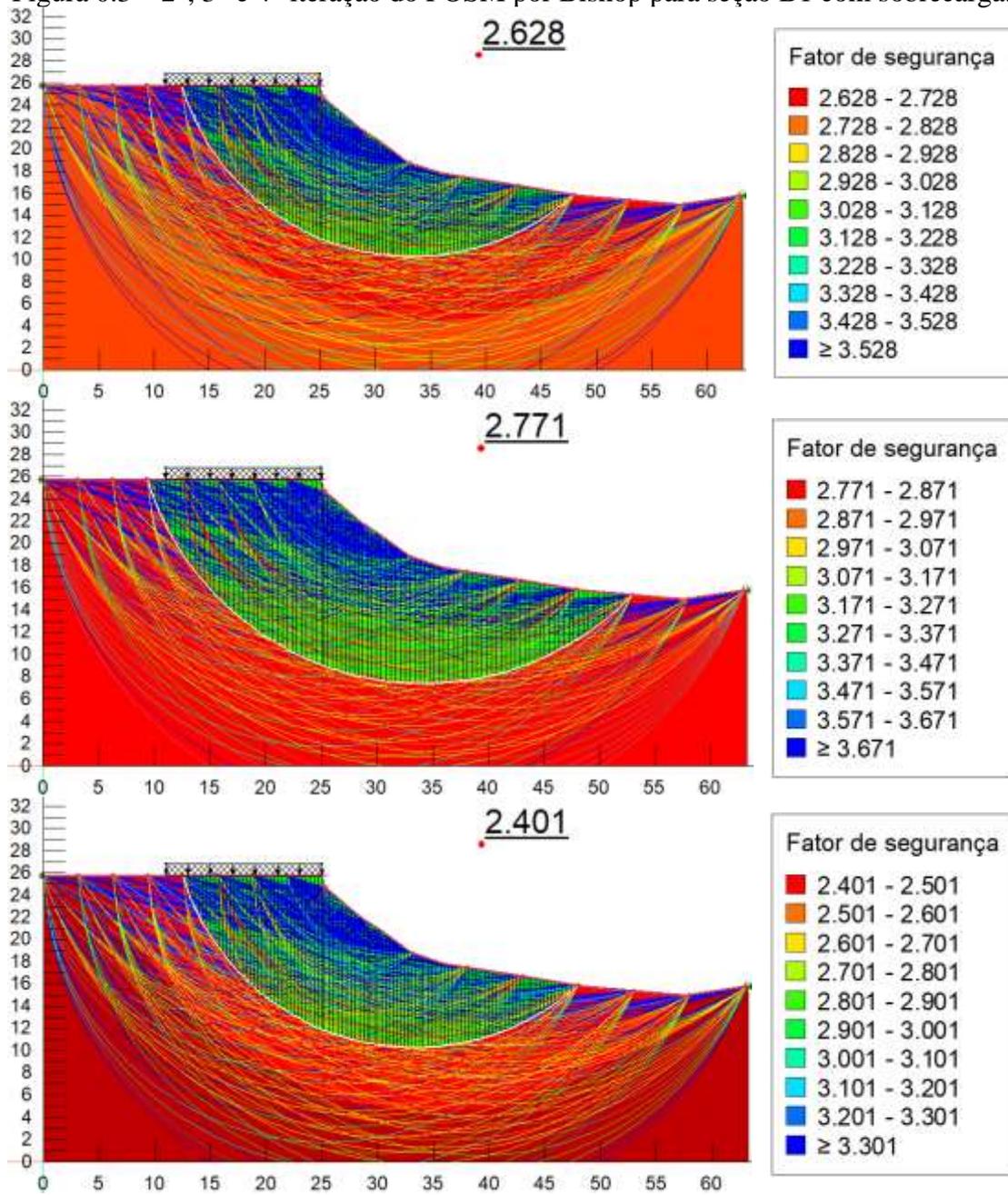
Fonte: Do autor (2020).

Figura 0.2 – 2º, 3º e 4º iteração do FOSM por Morgenstern-Price para seção B2 com sobrecarga.



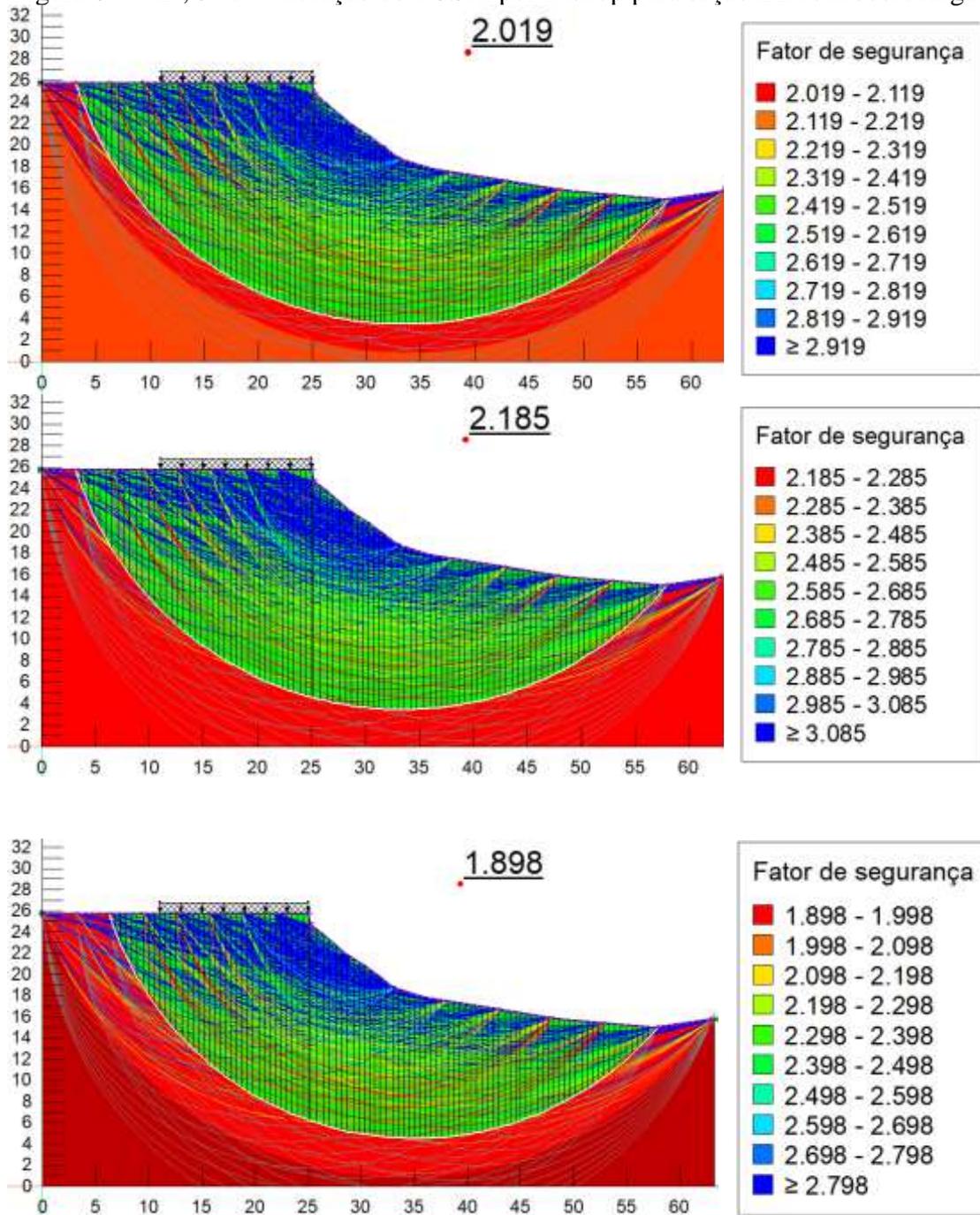
Fonte: Do autor (2020).

Figura 0.3 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Bishop para seção B1 com sobrecarga.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 0.4 – 2°, 3° e 4° iteração do FOSM por Bishop para seção B2 com sobrecarga.



Fonte: Do autor (2020).