

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

MARIANA PALAURO ALVES
STEPHANIE RAMOS ANGELI

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE POR DIFERENTES MÉTODOS

VITÓRIA - ES
2023

MARIANA PALAURO ALVES
STEPHANIE RAMOS ANGELI

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE POR DIFERENTES MÉTODOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil do Centro Tecnológico
da Universidade Federal do Espírito
Santo, para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.
Orientador: Dr. Bruno Teixeira Dantas.

VITÓRIA - ES
2023

MARIANA PALAURO ALVES
STEPHANIE RAMOS ANGELI

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE POR DIFERENTES MÉTODOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Vitória, 16 de fevereiro de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas

Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. Dra. Kátia Vanessa Bicalho

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

**Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques
Ribeiro**

Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

AGRADECIMENTOS

No fim de um ciclo encontro a necessidade de agradecer aos que me deram força e carinho para enfrentá-lo. Agradeço primeiramente a Deus, por guiar e iluminar meu caminho e meus pensamentos e por me fortalecer nos momentos que encontrei mais dificuldade.

Aos meus pais, Ivonete e Silvio, que sempre estiveram do meu lado, dando o apoio e o incentivo que eu mais precisava, juntamente com colo e aconchego. Além disso, sou grata por entenderem os momentos de ausência. Ao meu irmão gêmeo, Arthur, que desde a barriga está do meu lado em todos os momentos. Essa conquista não é só minha, é de vocês também.

Ao meu namorado, meus amigos e familiares, por estarem comigo ao longo dessa caminhada compartilhando momentos de alegria e de tristeza.

Aos meus professores, em especial nosso orientador Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas, por todo conhecimento passado, por, através de suas aulas, me ajudar a encontrar a área que gosto na engenharia, e por toda paciência ao longo desse processo. Aos professores Katia Vanessa Bicalho e Rômulo Castello Henriques Ribeiro, por aceitarem compor a banca examinadora.

Por fim, agradeço a minha dupla Stephanie, por sermos o braço direito uma da outra durante o curso e principalmente nesse trabalho de conclusão, sem você seria muito mais difícil.

Mariana Palauro Alves

AGRADECIMENTOS

A entrega desse projeto de graduação marca o fim de um ciclo. Agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui, por ter me fortalecido e pelos feitos incríveis em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Luziani e Edvaldo, por todo amor em me educar e todo o esforço dedicado para que eu pudesse chegar até aqui, só eu sei o quanto sacrificaram por mim, obrigada por me incentivar desde nova a seguir nesse caminho. Agradeço a minha irmã, Julia, pelas risadas e pela companhia, principalmente durante a pandemia, quando viu de perto todos os apertos e dificuldades.

Ao meu noivo, Saulo, agradeço primeiro por todo amor e acolhimento, por ser meu maior incentivador, por acreditar e apoiar. Por ter feito de tudo para que eu conseguisse chegar a essa reta final, e por me lembrar diariamente do quanto eu era e sou capaz. Sou muito feliz por ter você.

Minha eterna gratidão aos meus padrinhos, que vivenciaram esse sonho comigo há uns 7 anos atrás e aos meus tios que, de alguma forma, contribuíram nesses anos.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Bruno Teixeira Dantas por todo o suporte, pela dedicação, incentivo, confiança, paciência e sabedoria nas orientações.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação e em especial aos que compõe essa banca, Katia Vanessa Bicalho e Rômulo Castello Henriques Ribeiro.

Agradeço a minha dupla, Mariana, por ter dividido comigo não só esse trabalho de conclusão, mas tantos outros, por ter sido parceira durante todos esses anos. E principalmente, por me acalmar, em todos os momentos de surtos e desespero. Fico muito feliz de dividir essa conquista com você.

Stephanie Ramos Angeli

RESUMO

ALVES, M. P.; ANGELI, S. R. **Estudo da Estabilidade de um talude por diferentes métodos**. 2023. 69p. Projeto de Graduação. Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

A análise de estabilidade de taludes é importante para minimizar a possibilidade de escorregamentos de massa de solos em taludes naturais (por exemplo, encostas) e artificiais (por exemplo, aterros e cortes). Este trabalho implementou três métodos de análise de equilíbrio limite com o uso de planilha eletrônica (Excel) e comparou os resultados obtidos com o uso de um software comercial Slope/W® no estudo da estabilidade de um talude hipotético. Foram investigados efeitos do número de fatias e de iterações, da poropressão, dos parâmetros utilizados no critério de resistência ao cisalhamento do solo por meio de três métodos baseados no Equilíbrio Limite, Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. Os resultados das análises mostram uma boa correlação entre os resultados obtidos com os métodos denominados Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. O método de Fellenius mostrou-se o mais conservador ($FS=1,808$) para análises com poropressão nula, em relação ao Bishop Simplificado ($FS=1,882$) e Morgenstern-Price ($FS=1,877$). Observou-se que o número de fatias para o cálculo influencia pouco no refinamento do resultado, até que se utilize no mínimo oito fatias para os métodos abordados. Entre os parâmetros do solo, a coesão foi o que apresentou a maior influência (30%), e o peso específico total (7%), a menor para o caso em estudo. Observou-se que o cálculo com planilhas apresenta limitações e deve ser verificado por programas comerciais, funcionando principalmente para análises preliminares e para compreender o funcionamento de programas como Slope/W®.

PALAVRAS CHAVE: Análise de estabilidade; talude; métodos determinísticos; fator de segurança.

ABSTRACT

Slope stability analysis is important to minimize the possibility of landslides on natural slopes (ex slopes) and artificial slopes (ex embankments and cuts). This research implemented three methods based on the analysis of limit equilibrium using an electronic sheet (Excel) and compared the results obtained with the use of commercial software Slope/W® in the study of the stability of a hypothetical slope. Effects of the number of slices and iterations, pore pressure, parameters used in the soil shear strength criterion were investigated using three methods based on Limit Equilibrium, Fellenius, Simplified Bishop and Morgenstern-Price. The results of the analyzes show a good correlation between the results obtained with the methods called Bishop Simplified and Morgenstern-Price. The Fellenius method proved to be the most conservative (FS=1.808) for analyzes with zero pore pressure, compared to Bishop Simplified (FS=1.882) and Morgenstern-Price (FS=1.877). It was observed that the number of slices for the calculation has low influence on the refinement of the result, until a minimum of eight slices are used for the methods addressed. Among soil parameters, cohesion had the greatest influence (30%) and unit weight (7%) had the lowest influence for the case under study. It was observed that the calculation with sheets has limitations and must be verified by commercial programs, working mainly for preliminary analyzes and to understand the functioning of programs such as Slope/W®.

Keywords: stability analysis, slope, deterministic methods, factor of safety

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular	17
Figura 2: Resistência mobilizável e resistência mobilizada	20
Figura 3: Divisão de um talude em fatias	21
Figura 4: Método das fatias	22
Figura 5: Esforços em uma fatia genérica	22
Figura 6: Fatia de Fellenius	25
Figura 7: Fatia de Bishop	26
Figura 8: Força na fatia n	28
Figura 9: Planilha para cálculo do FS pelo Método de Fellenius	29
Figura 10: Planilha para cálculo do FS pelo Método de Bishop Simplificado	30
Figura 11: Forças que atuam na fatia com uma superfície de deslizamento circular	32
Figura 12: Forças que atuam na fatia com uma superfície de deslizamento circular	33
Figura 13: Dados da análise	36
Figura 14: Importar Regiões pelo AutoCAD	37
Figura 15: Inserir talude por desenho de pontos e regiões	37
Figura 16: Dados do material	37
Figura 17: Início da solução	38
Figura 18: Superfícies de Pesquisa	38
Figura 19: Local que se obtém as informações das fatias	38
Figura 20: Resultado	39
Figura 21: Opção de grades e raios	40
Figura 22: Esquemática da superfície por Entrada e Saída	40
Figura 23: Geometria do talude de referência	42
Figura 24: Exemplo de divisão com oito fatias	44
Figura 25: Informações do círculo da superfície crítica no Slope/W®	44
Figura 26: Diagrama da fatia com seu polígono de forças	45
Figura 27: Resultados pela planilha eletrônica - Fellenius	47
Figura 28: Resultados pela planilha eletrônica – Bishop Simplificado	47
Figura 29: Curva de ruptura – Fellenius	48
Figura 30: Curva de ruptura – Bishop Simplificado	48
Figura 31: Curva de ruptura – Morgenstern-Price	49

Figura 32: Curvas de ruptura para os três métodos	49
Figura 33: Curva de ruptura condição saturada – Fellenius.....	50
Figura 34: Curva de ruptura condição saturada – Bishop Simplificado.....	51
Figura 35: Curva de ruptura condição saturada – Morgenstern-Price.....	51
Figura 36: Gráfico Número de fatias x Fator de Segurança	52
Figura 37: Gráfico Coesão x FS por Fellenius.....	54
Figura 38: Gráfico Coesão x FS por Bishop Simplificado.....	55
Figura 39: Gráfico Coesão x FS por Morgenstern-Price	55
Figura 40: Gráfico Coesão x FS comparativo.....	56
Figura 41: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Fellenius.....	57
Figura 42: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Bishop Simplificado	58
Figura 43: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Morgenstern-Price.....	58
Figura 44: Gráfico Ângulo de atrito x FS comparativo.....	59
Figura 45: Gráfico Peso específico x FS por Fellenius.....	60
Figura 46: Gráfico Peso específico x FS por Bishop Simplificado.....	61
Figura 47: Gráfico Peso específico x FS por Morgenstern-Price.....	62
Figura 48: Gráfico Peso específico x FS comparativo.....	62

LISTA DE QUADROS

Tabela 1: Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas	18
Tabela 2: Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	18
Tabela 3: Fatores de segurança mínimos para deslizamento	18
Tabela 4 Parâmetros do talude de referência	43
Tabela 5 Valores adotados para análise da influência do número de fatias	45
Tabela 6 Parâmetros adotados	46
Tabela 7: Resultados obtidos pelo software x planilha.....	48
Tabela 8: Valores de FS encontrados pelo Slope/W®	50
Tabela 9: Resultado do Fator de Segurança através da variação do número de fatias 52	
Tabela 10: Resultados para variação da coesão – Fellenius	54
Tabela 11: Resultados para variação da coesão – Bishop Simplificado	54
Tabela 12: Resultados para variação da coesão – Morgenstern-Price	55
Tabela 13: Resultados para variação do ângulo de atrito – Fellenius.....	57
Tabela 14: Resultados para variação do ângulo de atrito – Bishop Simplificado	57
Tabela 15: Resultados para variação do ângulo de atrito – Morgenstern-Price	58
Tabela 16: Resultados para variação do peso específico – Fellenius.....	60
Tabela 17: Resultados para variação do peso específico – Bishop Simplificado	61
Tabela 18: Resultados para variação do peso específico – Morgenstern-Price.....	61
Tabela 19: Variação por intervalo (%) – coesão/Fellenius	67
Tabela 20: Variação por intervalo (%) – coesão/Bishop Simplificado	67
Tabela 21: Variação por intervalo (%) – coesão/Morgenstern-Price	67
Tabela 22: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Fellenius	67
Tabela 23: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Bishop Simplificado	68
Tabela 24: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Morgenstern-Price	68
Tabela 25: Variação por intervalo (%) – peso específico/Fellenius	68
Tabela 26: Variação por intervalo (%) – peso específico/Bishop Simplificado	68
Tabela 27: Variação por intervalo (%) – peso específico/Morgenstern-Price	69

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3.	ESTRUTURA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.	ESTABILIDADE DE TALUDES	15
2.1.1.	Análise de estabilidade de taludes	16
2.1.2.	Superfície de ruptura	16
2.1.3.	Fator de segurança	17
2.2.	MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE	19
2.2.1.	Método das fatias	21
2.3.	FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE	28
2.3.1.	Planilhas eletrônicas	28
2.3.2.	Slope/W	30
2.4.	PESQUISA DA SUPERFÍCIE CRÍTICA	39
2.4.1.	Grades e Raios	39
2.4.2.	Entrada e Saída	40
3.	ABORDAGEM METODOLÓGICA	41
3.1.	INTRODUÇÃO	41
3.2.	DEFINIÇÃO DO SOFTWARE E MÉTODO DE ANÁLISE	41
3.3.	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORPO DE ATERRO	42
3.4.	FATOR DE SEGURANÇA.....	43
3.5.	VALIDAÇÃO DO USO DA TABELA DE CÁLCULO	43
3.6.	DISCRETIZAÇÃO NO CÁLCULO DO FS	45
3.7.	ANÁLISE PARAMÉTRICA	46
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	47
4.1.	VALIDAÇÃO DO USO DA TABELA DE CÁLCULO	47
4.2.	DISCRETIZAÇÃO NO CÁLCULO DO FS	51
4.3.	ANÁLISE PARAMÉTRICA	53
4.3.1.	Coesão	53
4.3.2.	Ângulo de atrito	57
4.3.3.	Peso específico	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

6.	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE.....	67

1. INTRODUÇÃO

A crescente intervenção do espaço provocada pela ação humana exigiu que uma ciência tecnológica, como a Engenharia Civil, fornecesse métodos e modelos que permitissem a ocupação de áreas de relevo irregulares e de movimentações de terra. Seja para habitação, construção de barragens ou para obras de infraestrutura rodoviária e ferroviária, por exemplo, a intervenção é uma realidade. E, desse modo, a estabilidade de taludes torna-se uma análise essencial para os projetistas.

Segundo Silva (2011), a problemática em torno desse tema é uma questão transversal na área da geotecnia, pelo risco que obras como essas comportam no caso de ruptura, quer em termos de bens materiais e vidas humanas.

Para analisar o talude e a sua segurança, vários elementos são utilizados e, segundo Bona (2015), os elementos chave são a determinação dos parâmetros do solo, a verificação de influência de sobrecargas, a avaliação e inspeção do próprio local e o levantamento planialtimétrico. E, envolve ainda, a escolha do método de cálculo. Os documentos indicam que as pesquisas envolvendo os mecanismos de ruptura de taludes e os métodos de análise datam desde o início do século XX, por pesquisadores como Bishop e Fellenius (SILVA, 2011) e posteriormente outros métodos mais sofisticados consolidaram-se.

De acordo com Silva (2011), a maioria dos métodos desenvolvidos tem por base a Teoria do Equilíbrio Limite, muito utilizada ainda hoje. Determina-se a estabilidade de um talude apenas por equações de equilíbrio, adotando hipóteses que resolvam a indeterminação estática inerente à situação. Com a inserção de novas tecnologias e computadores que permitiram cálculos mais avançados, foi viabilizada e facilitada a implementação desses métodos, principalmente dos que exigiam um esforço de cálculo muito maior, que, por sua vez, eram considerados os mais rigorosos. Em razão do enorme aumento do poder de cálculo e a rápida difusão do computador pessoal, logo surgiram no mercado programas comerciais com a aplicação desses métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite.

Diante das possibilidades existentes é imprescindível para um profissional da engenharia responder questões como: “quais as diferenças, em termos de resultados, entre os métodos?”, “métodos manuais são representativos diante dos sofisticados recursos computacionais?” ou então “quantas divisões, em termo de número de fatias,

são necessárias para levar a análise a um resultado confiável?”, a fim de alcançar uma ponderação entre resultados confiáveis e representativos e o esforço de cálculo empreendido.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a estabilidade de um talude hipotético por meio de métodos determinísticos, de modo a obter o fator de segurança (FS) por diferentes métodos de Equilíbrio Limite.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar o FS obtido a partir de uma planilha eletrônica de cálculo pelos métodos de Fellenius e de Bishop Simplificado com o FS obtido por meio de um programa comercial, pelos mesmos dois métodos;
- Analisar os parâmetros envolvidos na estabilidade de taludes e destacar os mais relevantes para a determinação do fator de segurança.
- Comparar os valores de FS obtidos pelos métodos mencionados com o valor obtido pelo método de Morgenstern & Price;
- Avaliar a influência da discretização no cálculo do FS (influência do número de lamelas utilizado na análise no cálculo do FS);
- Elaborar uma planilha eletrônica para o cálculo do FS por Fellenius e Bishop Simplificado.

1.3. ESTRUTURA DO PROJETO DE GRADUAÇÃO

O presente projeto de graduação é estruturado em cinco capítulos.

No Capítulo 1, faz-se a introdução ao tema com uma contextualização sobre o assunto, os objetivos gerais e específicos e a organização do estudo.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica com os conceitos pertinentes relacionados à pesquisa. São abordados a estabilidade de taludes, os métodos determinísticos de análise de estabilidade e as ferramentas computacionais utilizadas.

No Capítulo 03, são abordados os procedimentos metodológicos para realização desta pesquisa. Apresentam-se a caracterização do talude hipotético para análise, a geometria definida, as considerações, os parâmetros e o fator de segurança buscado e o software utilizado.

No Capítulo 04, são expostos os resultados encontrados a partir das análises de estabilidade dos taludes via planilhas eletrônicas e software Slope/W®.

Por fim, o Capítulo 05 contempla as considerações finais observadas pelos autores, onde é destacado se o objetivo geral e a problemática de estudo foram respondidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais de estabilidade de taludes e de fator de segurança, os métodos de análise e o software utilizado no desenvolvimento das análises, de modo a fundamentar o presente trabalho.

2.1. ESTABILIDADE DE TALUDES

Caputo (1987) define por talude quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha. Originados por processos naturais, caso das encostas, ou artificiais, como os taludes de cortes e aterros. E a depender da sua origem, a realização de análises de estabilidade de taludes pode ter vários objetivos (Campos e Matos, 1980 apud SILVA, 2011). Nos naturais pretende-se avaliar a necessidade ou não de medidas de estabilização e no caso de barragens ou de aterros, busca-se encontrar a inclinação adequada para o talude de modo a alinhar dois aspectos fundamentais: a segurança e os custos (SILVA, 2011).

De modo geral, o objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído (GERSCOVICH, 2016).

A instabilidade de um talude é influenciada por diversos fatores, Terzaghi (1952 apud JUNIOR, 2005) as divide em: causas internas, externas e intermediárias. As causas internas são aquelas que atuam reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo constituinte do talude, sem ferir o seu aspecto geométrico visível. As externas são devidas às ações externas que alteram o estado de tensões atuantes sobre o maciço, resultando em um acréscimo das tensões cisalhantes que, igualando ou superando a resistência intrínseca do solo, levam o maciço à condição de ruptura. E as causas intermediárias são as que não podem ser explicitamente classificadas em uma das duas classes anteriormente definidas.

As pesquisas relacionadas aos mecanismos de ruptura foram datadas no início do século XX, por pesquisadores como Bishop e Fellenius, e como resultado de uma crescente ocupação urbana e intervenções do espaço, outros métodos foram se consolidando. A análise de estabilidade tornou-se imprescindível aos projetistas e facilitada com as novas tecnologias. Os requisitos exigíveis para o estudo e controle

da estabilidade de encostas e taludes resultantes de cortes e aterros são prescritos pela Norma Brasileira NBR 11682:2009, que também estabelece as condições para estudos, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização (ABNT, 2009).

2.1.1. Análise de estabilidade de taludes

A análise de estabilidade contempla o conjunto de procedimentos que possibilita a determinação de uma grandeza que quantifica, para uma determinada situação de sobrecargas, geometrias, pressões neutras, entre outras, o quão próximo da ruptura um determinado talude encontra-se (PIMENTA, 2005).

De acordo com Pimenta Junior (2005), dentre as metodologias existentes, existem três grandes grupos: os métodos analíticos, os experimentais e os observacionais.

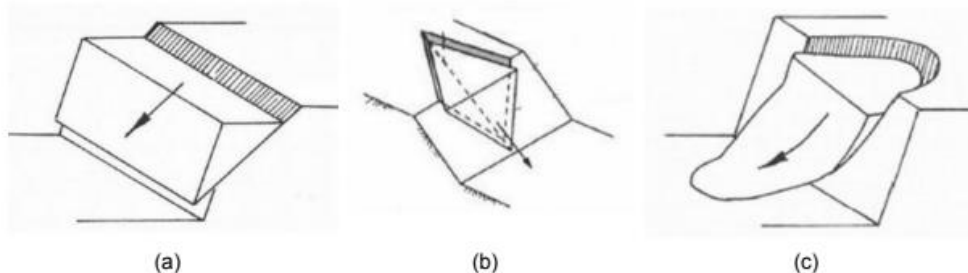
- Métodos analíticos: baseiam-se na teoria do equilíbrio limite, análise limite e nos modelos matemáticos de tensão e deformação;
- Métodos experimentais: empregam modelos físicos de diferentes escalas;
- Métodos observacionais: calcados na experiência acumulada com a análise de rupturas anteriores (retroanálise, ábacos de projetos, opinião de especialistas, etc.).

2.1.2. Superfície de ruptura

O estabelecimento de uma superfície de ruptura para o talude é fundamental para a obtenção de um fator de segurança. O formato pelo qual se dará a ruptura do solo dependerá do perfil que constitui o talude e sua formação geológica (PIMENTA, 2005).

As superfícies de ruptura podem apresentar-se como planares, circulares, em cunha ou mistas, resultado da associação da ruptura circular e plana. A Figura 1 exemplifica três movimentos de massa.

Figura 1: Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular



Fonte: Gerscovich (2016)

A superfície planar é comum em mantos de colúvio de pequena espessura sobre uma base em rocha, por isso geralmente ocorre em alguma superfície com presença de descontinuidade. A ruptura em cunha é resultado da presença de camadas de menor resistência na direção que não a paralela à superfície do talude, e desse modo o deslizamento ocorre em formato de um bloco ou cunha. E, a superfície circular, típica de solos relativamente homogêneos e com comportamento isotrópico, exibe-se como superfície de talude mais achatada, comumente adotada nos cálculos de estabilidade (GERSCOVICH, 2016).

2.1.3. Fator de segurança

A análise de estabilidade avalia a possibilidade de escorregamento por meio da comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Dessa forma, define-se o fator de segurança (FS) do talude. Esse tipo de abordagem é denominado determinístico, pois é obtido um determinado valor para o FS, com base nos valores médios dos parâmetros de resistência e do peso específico do solo. Cada projeto terá seu FS admissível que corresponderá a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil. (GERSCOVICH, 2016).

A NBR 11682:2009 pondera que “os fatores de segurança considerados na norma têm a finalidade de cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção”. Dependendo dos riscos envolvidos, deve-se inicialmente enquadrar o projeto em uma das seguintes classificações de nível de segurança, definidas a partir da possibilidade de perdas de vidas humanas, conforme Tabela 1, e de danos materiais e ambientais, conforme Tabela 2 (ABNT, 2009).

Tabela 1: Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

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

Fonte: ABNT (2009)

Tabela 2: Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

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

Fonte: ABNT (2009)

O fator de segurança mínimo a ser adotado no projeto, levando em conta os níveis de segurança preconizados nas Tabelas 1 e 2, deve ser estipulado de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Fatores de segurança mínimos para deslizamento

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

Fonte: NBR 11.682 (2009)

2.2. MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

De acordo com Silva (2011), a Teoria do Equilíbrio Limite é a base dos métodos de análise mais conhecidos na literatura e consiste na determinação do equilíbrio de uma massa de solo demarcada por uma superfície arbitrada. Assume-se que a massa de solo sobre a superfície de cisalhamento comporta-se como um corpo livre e que a ruptura ocorre nessa superfície, a superfície de ruptura, e que todos os seus elementos atingem o $FS=1$ simultaneamente. A superfície é subdividida em fatias e o equilíbrio é calculado pelas equações da estática, determinando as tensões cisalhantes induzidas (GERSCOVICH, 2016).

Em síntese, de acordo com Massad (2003), o método parte dos seguintes pressupostos:

- Solo comporta-se como material rígido-plástico, ou seja, rompe-se bruscamente, sem deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;
- Ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva, isto é, o FS é constante ao longo da linha de ruptura.

Nos taludes observa-se que a configuração da linha de ruptura sofre variações, o que resulta em diferentes fatores de segurança, à medida que cada seção é avaliada. E, como a análise é realizada em duas dimensões, a seção a ser considerada será a mais crítica, por exemplo, a de maior altura ou onde o talude apresenta maior inclinação. Vale pontuar que os efeitos de confinamento laterais não são tidos em conta (GOMES, 2011 apud SILVA, 2011).

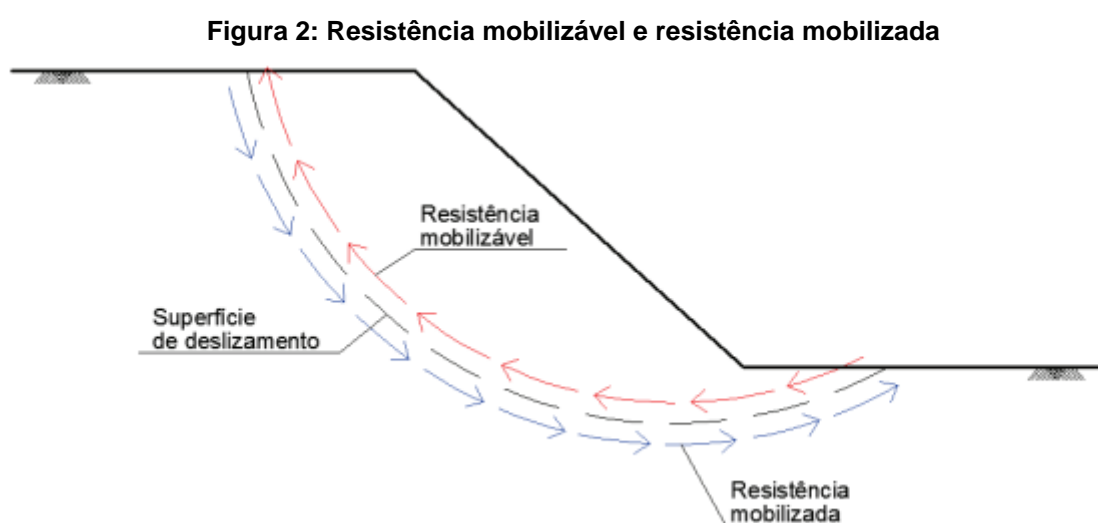
A determinação do fator de segurança pode ser feita de três formas: equilíbrio de forças, analisado em cada uma das fatias, equilíbrio de momentos, através da comparação dos momentos estabilizantes (que se opõem ao deslizamento) e instabilizantes (que favorecem o deslizamento) de todo o talude e do equilíbrio limite ao corte (SILVA, 2011).

$$\text{Equilíbrio de forças: } FS = \Sigma F_{estabilizadoras} / \Sigma F_{instabilizadoras} \quad (1)$$

$$\text{Equilíbrio de momentos: } FS = \Sigma M_{estabilizadores} / \Sigma M_{instabilizadores} \quad (2)$$

$$\text{Equilíbrio limite ao corte: } FS = \int \tau_{mobilizável} / \int \tau_{mobilizada} \quad (3)$$

Por Ferreira (2012), as forças estabilizadoras são as que obstam ao movimento da massa de solo e as instabilizadoras as que contribuem para o movimento da massa de solo. A resistência mobilizável é a força que se opõe ao movimento, compreendida como a resistência ao corte máxima que determinado solo consegue oferecer quando atuado, e a resistência mobilizada a resistência necessária para equilibrar o conjunto de cargas atuantes, ou seja, a força que origina o movimento (FERREIRA, 2012). A Figura 2 exemplifica o que explica Ferreira (2012):



Fonte: Silva (2011)

A vantagem do equilíbrio limite está na sua simplicidade e precisão dos resultados. No entanto, não é plausível afirmar que a ruptura da massa do talude ocorrerá toda simultaneamente, uma vez que inicialmente a resistência mobilizada é maior que a resistência mobilizável em alguns pontos e vai atingindo outros à medida que as deformações aumentam (SILVA, 2011).

Aplica-se a teoria de equilíbrio limite a vários tipos de análise de estabilidade que são comumente realizados pela aplicação de um dos três métodos seguintes (GOMES, 2011 apud SILVA, 2021).

- Método geral: as condições de equilíbrio são aplicadas a toda a massa de solo potencialmente instável, cujo comportamento se admite ser o de um corpo rígido;
- Método das fatias: a massa de solo potencialmente instável é dividida em fatias, geralmente verticais, e as condições de equilíbrio são aplicadas a cada uma das fatias isoladamente;
- Método das cunhas: a massa de solo potencialmente instável, dada a sua configuração e características resistentes, é dividida em cunhas, e as

condições de equilíbrio são aplicadas a cada zona isoladamente (GOMES, 2011 apud SILVA, 2021).

Na sequência explica-se, brevemente, o método das fatias, e em seguida, uma breve explanação de alguns dos métodos de análise de estabilidade de taludes.

2.2.1. Método das fatias

Grande parte das análises de estabilidade utiliza-se do método das fatias, por este não apresentar restrições quanto ao tipo de análise, geometria do talude e homogeneidade do solo. Deste modo, esse método permite que geometrias mais ou menos complexas, solos heterogêneos e considerações de pressões neutras possam ser analisadas (SILVA, 2011).

Para isso, arbitra-se uma superfície de deslizamento, circular ou não, divide-se o talude em fatias (Figura 3), de base linear, de modo a garantir que a base da fatia esteja contida no mesmo material e que o topo da fatia não apresente descontinuidades e calcula-se o equilíbrio da massa de solo através das equações da estática, para cada uma das fatias (GERSCOVICH, 2016).

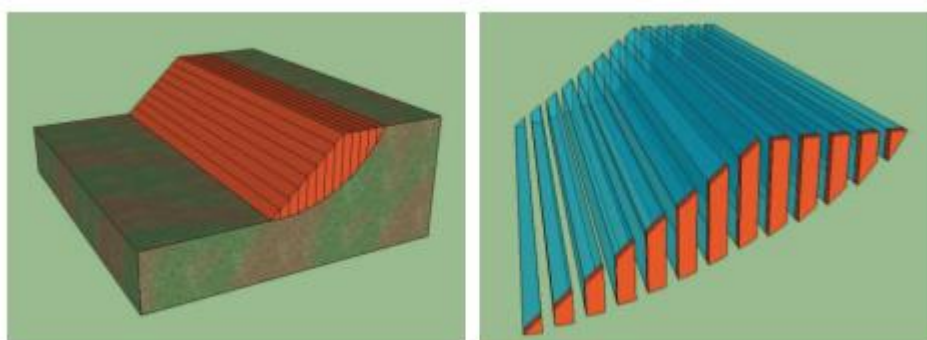
$$\sum F_v = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_h = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_o = 0 \quad (6)$$

Onde $\sum F_v$ é o somatório de forças verticais, $\sum F_h$ o somatório de forças horizontais e $\sum M_o$ o somatório de momentos.

Figura 3: Divisão de um talude em fatias

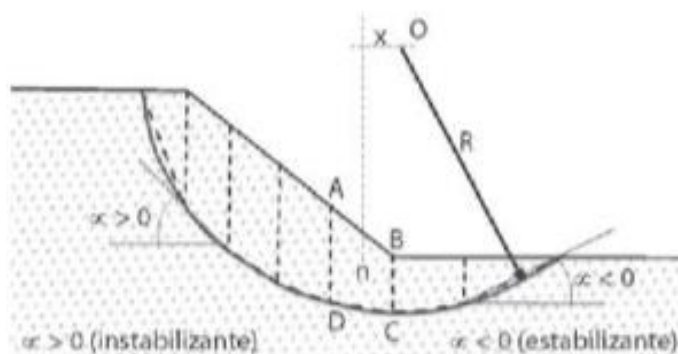


Fonte: Silva (2011)

Assume-se que as tensões normais na base da fatia sejam geradas pelo peso de solo contido na fatia e a resistência na base pode ser definida em termos totais ou efetivos e calcula-se o equilíbrio do conjunto por meio do equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo, considerando também as forças tangenciais na base das fatias e pesos. Além disso, considera-se nulo o somatório dos momentos das forças interlamelares (GERSCOVICH, 2016).

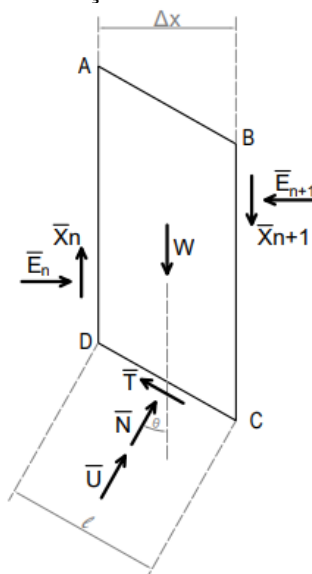
A Figura 4 ilustra a divisão de um talude pelo método das fatias e a Figura 5 ilustra uma fatia genérica, com a indicação das forças e dos parâmetros desconhecidos, são eles, a força peso da fatia (W), a força resultante das pressões neutras (U), forças horizontais nas laterais das fatias (E), resistência vertical entre fatias (X), força de cisalhamento de resistência (T) e a força normal na base da fatia (N) (GERSCOVICH, 2016).

Figura 4: Método das fatias



Fonte: Gerscovich (2016)

Figura 5: Esforços em uma fatia genérica



Fonte: Modificado Gerscovich (2016)

Pelo equilíbrio de momentos atuantes e resistentes, da Figura 5, tem-se:

$$M_{estabilizantes} = \sum T \cdot R \quad (7)$$

$$M_{instabilizantes} = \sum W_i \cdot x_i \quad (8)$$

Seja:

$$x_i = R \cdot \text{sen}\theta \quad (9)$$

E,

$$T = \tau \cdot l = \frac{1}{FS} \cdot s \cdot l \quad (10)$$

$$s = c' + \sigma' \cdot \text{tg}\phi' \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{FS} \cdot (c' + \sigma' \cdot \text{tg}\phi') \cdot l \quad (12)$$

$$N' = \sigma' \cdot l \quad (13)$$

$$T = \frac{1}{FS} \cdot (c'l + N' \cdot \text{tg}\phi') \quad (14)$$

Para

$$\text{Retomando (6): } \sum M_o = 0$$

Tem-se:

$$\sum \frac{1}{FS} \cdot (c'l + N' \cdot \text{tg}\phi') \cdot R = \sum W_i \cdot R \cdot \text{sen}\theta \quad (15)$$

Isolando FS, define-se:

$$FS = \frac{\sum(c'l + N' \cdot \text{tg}\phi')}{\sum W_i \cdot \text{sen}\theta} \quad (16)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante atuante;

l = comprimento da base da lamela

s = resistência ao cisalhamento do solo

FS = fator de segurança

ϕ = ângulo de atrito

A subdivisão da massa de solo em mais de uma fatia resulta em um problema de hiperestaticidade, isso porque o número de incógnitas ultrapassa o número de equações possíveis (DUCAN E WRITH, 1980 apud SOUZA, 2019). Essa adversidade do método, matematicamente, ocorre da seguinte forma: para uma massa de solo dividida em n fatias, tem-se $4 \cdot n$ equações e $(6n-2)$ incógnitas. São diferentes e inúmeras as propostas para a solução dessa situação, mas o que todas têm em comum é a consideração do esforço normal na base da fatia atuando exatamente no centro, reduzindo a quantidade de incógnitas para $(5n-2)$ (GERSCOVICH, 2016). Por fim, é feita uma comparação das tensões com a resistência ao cisalhamento do solo.

Dentre os métodos desenvolvidos ao longo dos anos observa-se que as suas diferenças residem nas equações da estática que são satisfeitas, nas forças entre fatias consideradas no cálculo e na distribuição das forças de interação (SILVA, 2011).

2.2.1.1. Método de Fellenius

O método de Fellenius é descrito na literatura como o mais simples dos métodos existentes, pois determina o fator de segurança através de uma equação linear, dispensando qualquer processo iterativo (SILVA, 2011). Segundo Ferreira (2012), Fellenius foi o primeiro a introduzir um método de análise para uma superfície de deslizamento circular em 1936, método esse que ficou associado ao seu nome, sendo também conhecido como Método Sueco.

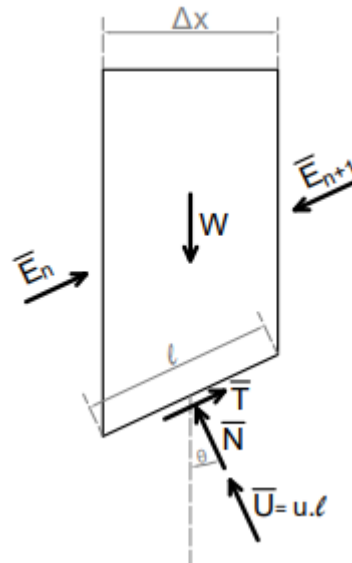
Massad (2003) explica que, para o método de Fellenius, a direção da resultante das forças laterais E e X , atuantes nas faces verticais das fatias, é considerada paralela à base das fatias e de mesma ordem de grandeza, o que permite que sejam excluídas dos cálculos, como mostrado na Figura 6. Pode-se dizer que admite que não há influência de uma fatia sobre a outra: desconsidera as forças interlamelares.

O equilíbrio das forças é realizado na direção da normal à base da fatia e resulta, de acordo com a Figura 6, em:

$$N' + U = W \cdot \cos\theta \quad (17)$$

$$N' = W \cdot \cos\theta - u \cdot l \quad (18)$$

Figura 6: Fatia de Fellenius



Fonte: Massad (2003)

Por trigonometria, tem-se:

$$l = \Delta x \cdot \sec\theta \quad (19)$$

E,

$$N' = W \cdot \cos\theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec\theta \quad (20)$$

Substituindo na equação FS, obtém-se:

$$FS = \frac{\sum(c'l + (W \cdot \cos\theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec\theta) \cdot \operatorname{tg}\phi')}{\sum W_i \cdot \operatorname{sen}\theta} \quad (21)$$

A simplificação adotada por Fellenius não é verdadeira, dado que, para as forças serem paralelas à base da fatia, não podem ter a mesma inclinação em todas as fatias e quando se muda para a fatia seguinte a inclinação muda (Fredlund, 1977 apud SILVA, 2011).

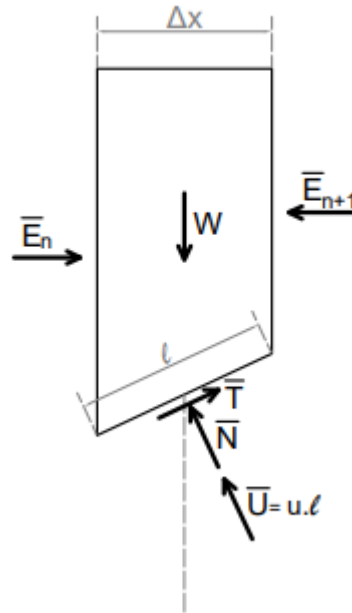
Segundo Gerscovich (2016), o método é conservador, pois tende a fornecer baixos valores de FS. Ademais, pontua que em círculos de ruptura que atingem maiores profundidades, o método entrega valores pouco confiáveis.

2.2.1.2. Método de Bishop Simplificado

O Método Bishop Simplificado foi desenvolvido por Bishop em 1955. Diferencia-se do método de Fellenius por considerar que a direção da resultante das forças laterais E e X, atuantes nas faces verticais das fatias, é horizontal. O equilíbrio das

forças, por sua vez, é tomado na direção vertical (MASSAD, 2003). A Figura 7 exemplifica uma fatia genérica pelo método de Bishop.

Figura 7: Fatia de Bishop



Fonte: Massad (2003)

O desenvolvimento de cálculo para obtenção do FS para o método de Bishop ocorre da seguinte forma:

$$\text{Retomando (5)} \quad \sum F_v = 0$$

$$W - N' \cdot \cos\theta - U \cdot \cos\theta - T \cdot \text{sen}\theta = 0 \quad (22)$$

Tendo em vista,

$$T = \frac{1}{FS} \cdot (c'l + N' \cdot \text{tg}\phi') \quad (23)$$

$$l = \frac{\Delta x}{\cos\theta} \quad (24)$$

$$U = u \cdot l \quad (25)$$

Tem-se:

$$W - N' \cdot \cos\theta - U \cdot \cos\theta - \frac{1}{FS} \cdot (c'l + N' \cdot \text{tg}\phi') \cdot \text{sen}\theta = 0 \quad (26)$$

$$W - u \cdot \frac{\Delta x}{\cos\theta} \cdot \cos\theta - \frac{1}{FS} \cdot \left(c' \cdot \frac{\Delta x}{\cos\theta} \cdot \text{sen}\theta \right) = N' \cdot \cos\theta + \frac{1}{FS} \cdot (N' \cdot \text{tg}\phi' \cdot \text{sen}\theta) \quad (27)$$

$$W - u \cdot \Delta x - \frac{1}{FS} \cdot (c' \cdot \Delta x \cdot \text{tg}\theta) = N' \cdot \left(\cos\theta + \frac{\text{tg}\phi' \cdot \text{sen}\theta}{FS} \right) \quad (28)$$

$$N' = \frac{W - u \cdot \Delta x - \frac{1}{FS} \cdot (c' \cdot \Delta x \cdot tg\theta)}{\cos\theta + \frac{tg\phi' \cdot \text{sen}\theta}{FS}} \quad (29)$$

Substituindo em FS, observa-se que o cálculo do fator de segurança ocorre por processo iterativo, uma vez que N' é função de FS. Para isso adota-se um FS inicial (FSi) e extrai-se um FS da expressão abaixo. Compara-os. Se a precisão não foi atingida, repete-se o processo até que o valor calculado se iguale ao arbitrado (FSi)

$$FS = \frac{\sum \left(c'l + \frac{W - u \cdot \Delta x - \frac{1}{FS} \cdot (c' \cdot \Delta x \cdot tg\theta)}{\cos\theta + \frac{tg\phi' \cdot \text{sen}\theta}{FS}} \cdot tg\phi' \right)}{\sum W_i \cdot \text{sen}\theta} \quad (30)$$

Segundo Gerscovich (2016), a comparação entre os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Bishop e Fellenius tende a apresentar a seguinte relação:

$$\text{Tensões efetivas: } FS_{Bishop} \cong 1,25 \cdot FS_{Fellenius} \quad (31)$$

$$\text{Tensões totais: } FS_{Bishop} \cong 1,1 \cdot FS_{Fellenius} \quad (32)$$

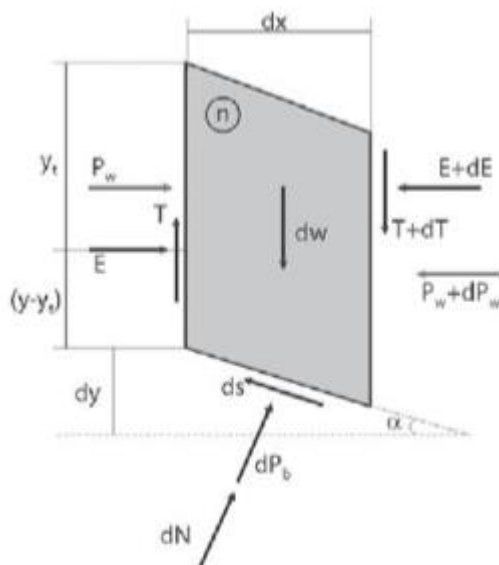
De acordo com DUNCAN E WRIGHT, 1980 (apud Souza, 2019), apesar do método de Bishop não satisfazer todas as condições de equilíbrio, ele apresenta resultados tão precisos quanto outros métodos que utilizam todas as equações de equilíbrio para determinar o fator de segurança.

2.2.1.3. Morgenstern & Price

Em 1965, Morgenstern e Price desenvolveram um método mais generalizado para a análise de estabilidade de uma superfície qualquer (Gerscovich, 2016). Pertencente ao grupo dos métodos mais rigorosos, cumpre todas as condições de equilíbrio (SILVA, 2011).

As forças de interação são, neste caso, controladas por uma função f(x) multiplicada por um fator λ , que deve ser especificada previamente. Essa função determina a inclinação das forças entre fatias, como é visto na Figura 8 (SILVA, 2011)

Figura 8: Força na fatia n



Fonte: Gerscovich (2016)

Segundo Silva (2011), o fator de segurança e o valor de λ são obtidos através da combinação das equações de equilíbrio de forças nas direções normal e tangencial à base das fatias e de uma equação de momentos, formando um sistema. A obtenção da solução numérica é feita por iteração, dada a não linearidade das expressões.

2.3. FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

O mercado dispõe de planilhas e softwares para análise de estabilidade que permitem a aplicação dos diversos métodos, dos mais simplificados até os mais sofisticados, desenvolvidos com o passar do tempo e com o aumento do poder computacional, que possibilitam o alcance de resultados mais rigorosos e reais (SOUZA, 2019).

2.3.1. Planilhas eletrônicas

Como visto nas seções anteriores, são diversos os métodos para análise de estabilidade de taludes baseados no conceito de equilíbrio-limite. Os métodos de Fellenius e Bishop Simplificado permitem a solução de forma manual dessas análises por não se tratarem de métodos rigorosos como é o de Morgenstern-Price. Assim, podem-se fazer os cálculos apresentados anteriormente de forma simples e rápida através de planilhas eletrônicas.

2.3.1.1. Planilha com base no Método de Fellenius

Para o cálculo do fator de segurança por meio do método de Fellenius cuja solução é obtida a partir da Equação 21, são necessárias as informações das propriedades do solo, isto é, o peso específico, a coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo, além das características de cada fatia da superfície de ruptura analisada como a área, a altura média, a largura, o peso (calculado pela multiplicação da área da fatia pelo peso específico do solo presente nela), o ângulo entre o raio do círculo que passa pelo centro da base da fatia e a vertical que passa pelo ponto de origem do arco de circunferência arbitrado e a tensão neutra.

Com todas essas informações, é possível calcular tanto o numerador quanto o denominador da equação do fator de segurança de cada fatia e com a divisão do somatório de cada fatia, encontra-se o fator de segurança total do talude. A Figura 9 exibe a planilha utilizada para o cálculo do FS pelo Método de Fellenius.

Figura 9: Planilha para cálculo do FS pelo Método de Fellenius

yt (kN/m ³)										
c' (kPa)										
φ' (graus)										
φ' (rad)										
Fatia	Área (m ²)	hi (m)	bi(m)	u (kPa)	θ' (°)	θ' (rad)	Wi (kN/m)	N'i (kN/m)	Numerador de FS	Denominador de FS
1						0	0	0	0	0
2						0	0	0	0	0
3						0	0	0	0	0
4						0	0	0	0	0
5						0	0	0	0	0
6						0	0	0	0	0
7						0	0	0	0	0
8						0	0	0	0	0
Soma									0	0

FS #DIV/0! Calculado

Fonte: Autor (2022)

2.3.1.2. Planilha do Método de Bishop Simplificado

As informações necessárias para a resolução desse método são as mesmas apresentadas na seção anterior. No método de Bishop Simplificado, no entanto, o cálculo da resultante das tensões efetivas normais na base da fatia necessita de um fator de segurança arbitrado para iniciar um processo iterativo até que o fator de segurança arbitrado se iguale ao encontrado de forma decimal. A Figura 10 exibe a planilha utilizada para o cálculo do FS pelo Método de Bishop Simplificado.

Figura 10: Planilha para cálculo do FS pelo Método de Bishop Simplificado

yt (kN/m ³)		FS 1,5 Arbitrado											
c' (kPa)									N'i (kN/m)		Numerador de FS		Denominador de FS
φ' (graus)													
φ' (rad)													
Fatia	Área (m ²)	bi(m)	u (kPa)	θ' (°)	θ' (rad)	Wi (kN/m)	Numerador	Denominador	N'i (kN/m)	Fri	Wi.senθi		
1					0	0	0	1	0	0	0		
2					0	0	0	1	0	0	0		
3					0	0	0	1	0	0	0		
4					0	0	0	1	0	0	0		
5					0	0	0	1	0	0	0		
6					0	0	0	1	0	0	0		
7					0	0	0	1	0	0	0		
8					0	0	0	1	0	0	0		
										Soma	0	0	
		FS #DIV/0! Calculado											

Fonte: Autor (2022)

2.3.2. Slope/W

Nessa seção são definidas as variáveis utilizadas no software e em seguida será feita uma descrição do método utilizado chamado Teoria do Equilíbrio Limite Geral (GLE). Nesse método as equações são derivadas, incluindo a equação da força normal na base e as equações dos fatores de segurança.

O Slope/W® soluciona duas equações de fator de segurança: uma que satisfaz o equilíbrio de forças e outra o equilíbrio de momentos. Todos os métodos de fatias apresentados anteriormente podem ser considerados casos especiais do GLE.

2.3.2.1. Definição de Variáveis

O software Slope/W® utiliza a teoria de equilíbrio de forças e momentos para calcular o fator de segurança. Esse fator é definido como o valor a que a resistência ao cisalhamento deve ser reduzida para que a massa de solo se encontre em equilíbrio ao longo da superfície (SLOPE, 2022).

A resistência ao cisalhamento é definida como:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan\phi' \quad (33)$$

onde:

τ = resistência ao cisalhamento

c' =coesão efetiva

ϕ = ângulo de atrito efetivo

σ_n = tensão normal total

u = poropressão

Para uma análise de tensão total, os parâmetros de resistência são definidos em termos da tensão total e a poropressão não é considerada (SLOPE, 2022).

Na análise de estabilidade, a superfície de ruptura passa sobre a massa de solo e é dividida em fatias verticais, na parte inscrita dessa divisão (SLOPE, 2022).

O equilíbrio limite assume, conforme consta no Manual do SLOPE (2022):

- I. O fator de segurança de componentes coesivos de resistência e do componente de atrito de resistência é igual para todos os solos envolvidos;
- II. O fator de segurança é o mesmo para todas as fatias.

2.3.2.2. Teoria do Equilíbrio Limite Geral (GLE)

A formulação da GLE se baseia em duas equações de fatores de segurança e permite uma variedade de condições de força normal de cisalhamento entre as fatias. Uma equação encontra o fator de segurança em relação ao equilíbrio de momentos – F_m – enquanto a outra entrega em relação ao equilíbrio de forças horizontais – F_f - (SLOPE, 2022).

O cisalhamento entre fatias no Equilíbrio Limite Geral é tratado com a seguinte equação proposta por Morgenstern and Price (1965):

$$X = E \cdot \lambda \cdot f(x) \quad (34)$$

Onde:

$f(x)$ = função

λ = porcentagem da função utilizada

E = força normal entre fatias

X = cisalhamento entre fatias

A equação do fator de segurança quanto ao equilíbrio de momentos é:

$$F_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R \cdot \tan\phi')}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (35)$$

Já equação do fator de segurança quanto ao equilíbrio de forças horizontais é:

$$F_f = \frac{\sum(c'\beta \cdot \cos\alpha + (N - u\beta)\tan\phi' \cdot \cos\alpha)}{\sum N \cdot \sin\alpha - \sum D \cdot \cos\omega} \quad (36)$$

Em que:

c' = coesão efetiva

ϕ' = ângulo de atrito efetivo

u = poropressão

N = força normal na base da fatia

W = peso da fatia

D = carga pontual concentrada

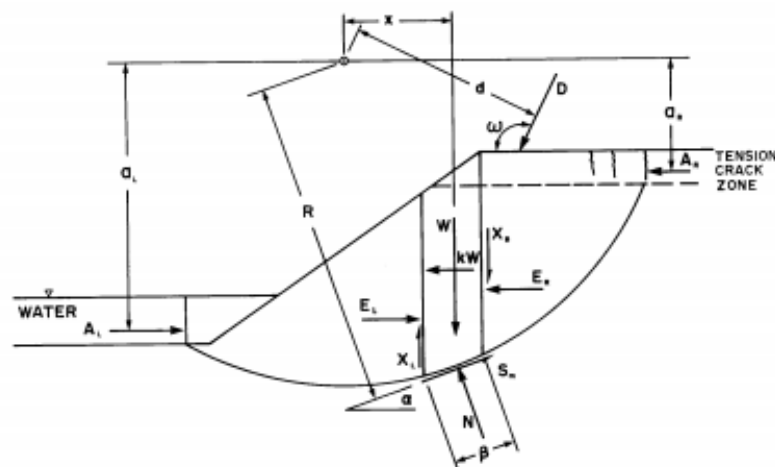
f = o deslocamento perpendicular da força normal do centro de rotação ou do centro de momentos

$\beta, R, x, f, d, \omega$ = parâmetros geométricos

α = inclinação da base da fatia

Os parâmetros indicados nas equações acima podem ser vistos na Figura 11 e Figura 12, representativa das fatias presentes nas análises.

Figura 11: Forças que atuam na fatia com uma superfície de deslizamento circular



Fonte: Manual Slope/W® (2021)

2.3.2.3. Equilíbrio de Momentos

O somatório de momento para todas as fatias em um ponto em comum pode ser escrito como (SLOPE, 2022):

$$\sum Wx - \sum S_m R - \sum Nf + \sum kW e \pm \sum Dd \pm \sum Aa = 0 \quad (38)$$

Substituindo S_m , resistência ao cisalhamento mobilizada na base de cada fatia, o fator de segurança em relação ao momento é definido por:

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u\beta) R \cdot \tan \phi')}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kW e \pm \sum Dd \pm \sum Aa} \quad (39)$$

$$S_m = \frac{\tau \beta}{F} \quad (40)$$

Além dos parâmetros já indicados na seção anterior, as equações apresentadas também possuem os seguintes:

kW = Carregamento sísmico horizontal no centroide de cada fatia

e = Distância vertical do centroide da fatia até o centro de rotação/centro do momento;

A = Resultante da força d'água externa às fatias;

a = Distância perpendicular da resultante da força externa d'água até o centro de rotação/centro do momento.

2.3.2.4. Equilíbrio de Forças

O somatório de forças para todas as fatias é definido como:

$$\begin{aligned} \sum (E_L - E_R) - \sum (N \cdot \text{sen} \alpha) \\ + \sum (S_m \cdot \text{cos} \alpha) - \sum (kW) + \sum D \cdot \text{cos} \omega \pm \sum A = 0 \end{aligned} \quad (41)$$

Assim como na seção anterior, substituindo S_m , encontra-se a seguinte formulação:

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cdot \text{cos} \alpha + (N - u\beta) \cdot \tan \phi' \cdot \text{cos} \alpha)}{\sum N \cdot \text{sen} \alpha + \sum kW - \sum D \cdot \text{cos} \omega \pm \sum A} \quad (42)$$

Além dos parâmetros já indicados nas seções anteriores, o parâmetro E é referente à força horizontal entre fatias, e L e R significam esquerda e direita, respectivamente.

2.3.2.5. Força Normal na base da fatia

A equação da força normal, como apresentada na Equação 37, é não linear, em que o valor depende do FS. Conseqüentemente, N precisa ser determinado usando um esquema iterativo. O valor inicial de FS é obtido por uma equação de N simplificada, que também é o valor do fator de segurança de Fellenius (SLOPE, 2022).

2.3.2.6. Força entre fatias

A força entre fatias é usada apenas na teoria de Morgenstern-Price e a mais utilizada é a constante e a meio-sino. Elas são a força normal e a de cisalhamento atuantes na vertical das faces entre fatias. A força normal entre fatias é solucionada usando uma integração iniciando na esquerda de cada superfície, isso porque a força normal à esquerda dessa fatia é igual a zero (SLOPE, 2022).

Uma vez sabendo o valor da força normal, o cisalhamento entre fatias é calculado como uma porcentagem da normal de acordo com a Equação 34 (SLOPE, 2022).

2.3.2.7. Etapas para o fator de segurança

São quatro as etapas envolvendo o cálculo do fator de segurança no Slope/W® (SLOPE, 2022):

- I. A força normal e de cisalhamento entre fatias são zeradas. O fator de segurança gerado através do momento de equilíbrio é o fator de segurança de Fellenius. Essa interação é utilizada na segunda etapa.
- II. A segunda etapa se inicia com a solução das equações não lineares para o fator de segurança. Lambda é zerado e, conseqüentemente, a interação entre fatias também. Normalmente são necessárias 4 a 6 iterações para convergir os fatores de segurança de força e momento.

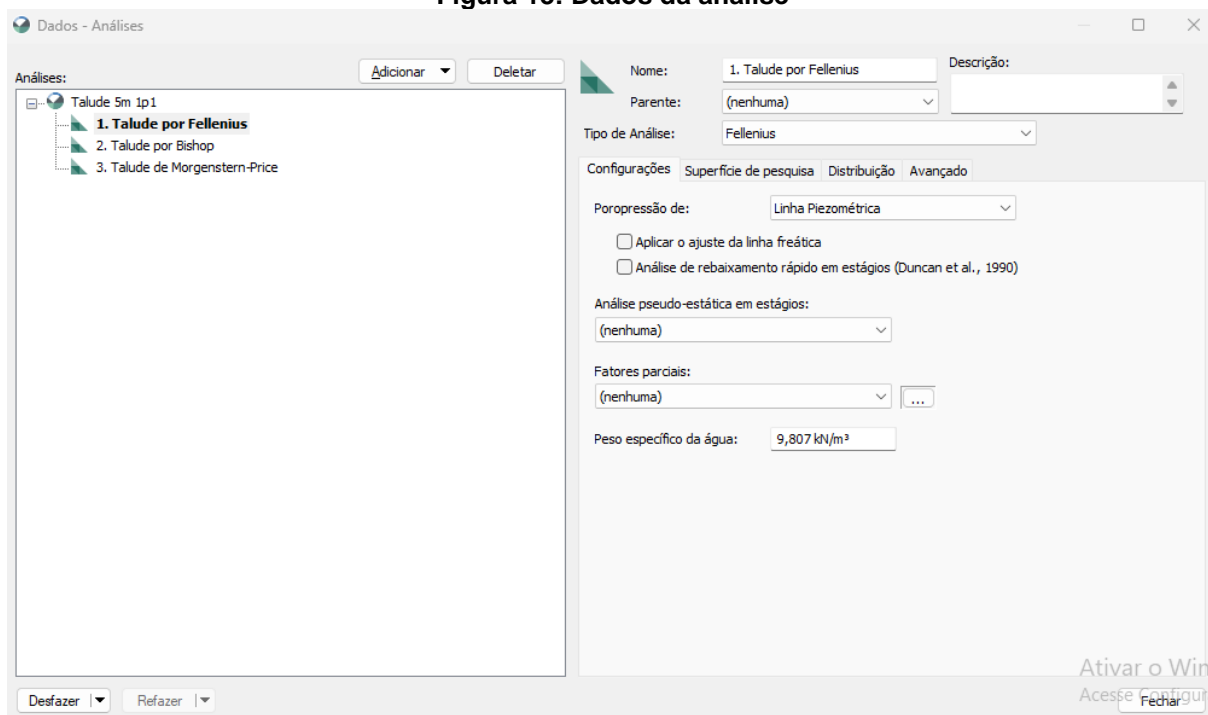
O valor da equação de momento corresponde ao método de Bishop Simplificado.

- III. A terceira etapa é utilizada apenas para os métodos que consideram as forças entre fatias. Nessa etapa, uma série de valores para lambdas são utilizados e as equações do fator de segurança de momento e/ou de força são resolvidas. O FS selecionado é aquele que satisfaz ambas as equações.

2.3.2.8. Utilização do programa

Apresentam-se nesta seção as etapas necessárias para o cálculo do fator de segurança por meio do software Slope/W. Primeiramente, assim que criado o arquivo, é preciso definir o método a ser utilizado e se haverá poropressão no talude, como mostrado na Figura 13. A forma de análise da superfície de pesquisa (Entrada e Saída ou Grades e Raios) e a quantidade de fatias também devem ser definidas.

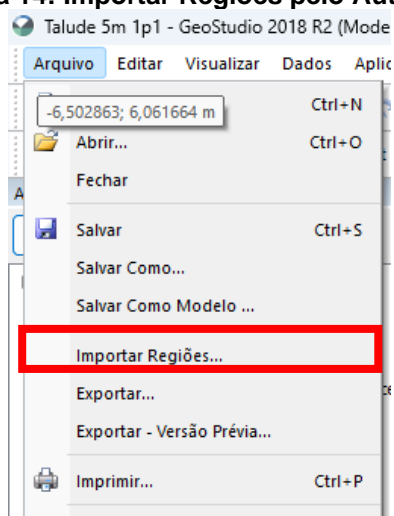
Figura 13: Dados da análise



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, deve ser gerado o talude a ser analisado. Isso pode ocorrer de duas maneiras: importando um desenho do AutoCAD, Figura 14, ou desenhando no próprio programa através de pontos e regiões, Figura 15.

Figura 14: Importar Regiões pelo AutoCAD



Fonte: Autor (2022)

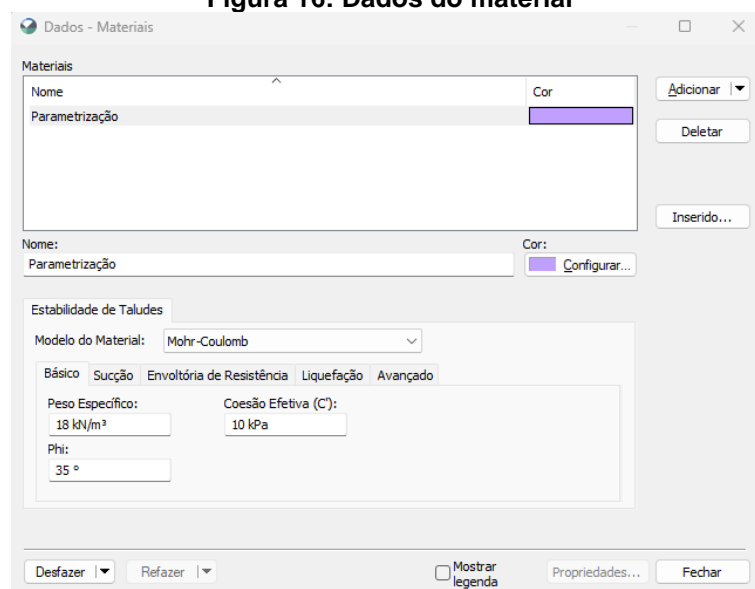
Figura 15: Inserir talude por desenho de pontos e regiões



Fonte: Autor (2022)

Após o talude inserido, é feita a definição dos parâmetros do material, vide Figura 16. Como os cálculos de resistência ao cisalhamento antes apresentados e, conseqüentemente, o fator de segurança são dependentes da coesão, peso específico e ângulo de atrito são eles os definidos e aplicados na massa de solo.

Figura 16: Dados do material

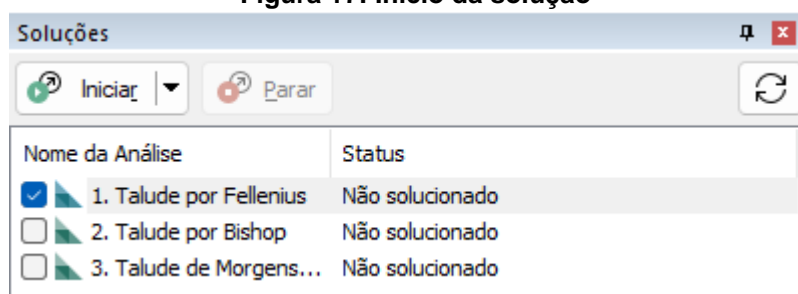


Fonte: Autor (2022)

Por fim, antes da execução do Slope/W, é inserida a opção de superfície de pesquisa antes já definida e a poropressão, caso seja diferente de zero.

Para a execução, apenas marcam-se as análises a serem realizadas e clica-se no botão iniciar apresentado na Figura 17.

Figura 17: Início da solução



Fonte: Autor (2022)

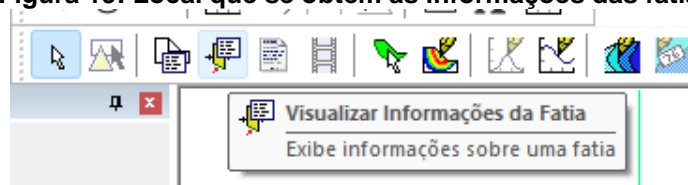
Assim, após o desenvolvimento da solução, o software apresenta a superfície crítica de ruptura, juntamente com todos os fatores de segurança calculados, vide Figura 18 e Figura 20. Caso necessário, é possível avaliar as características presentes em cada fatia utilizada no método, vide Figura 19.

Figura 18: Superfícies de Pesquisa

Superfície #	FS	Centro X (m)	Centro Y (m)	Raios (m)	Detalhes
3.583	1,249	9,7782	12,855	7,858	Crítica (anál
3.563	1,257	9,6967	12,295	7,2967	
3.582	1,260	9,422	13,392	8,3931	
3.246	1,263	9,2943	13,575	8,5847	
3.602	1,266	9,4085	14,168	9,1688	
3.562	1,269	9,3774	12,746	7,7486	
3.266	1,270	9,2697	14,384	9,3918	
3.020	1,270	9,1002	14,605	9,6154	

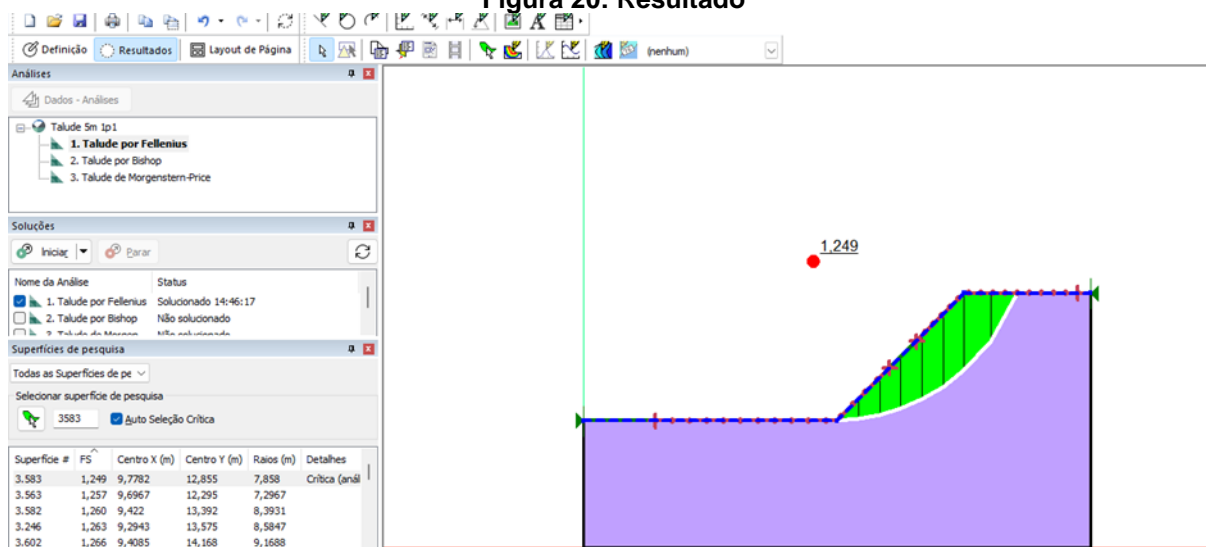
Fonte: Autor (2022)

Figura 19: Local que se obtém as informações das fatias



Fonte: Autor (2022)

Figura 20: Resultado



Fonte: Autor (2022)

2.4. PESQUISA DA SUPERFÍCIE CRÍTICA

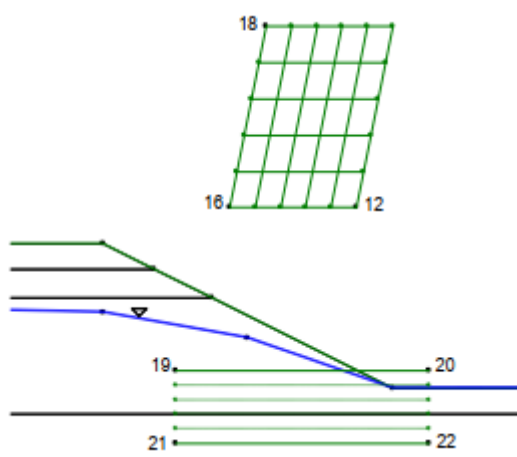
A determinação da superfície crítica, isto é, da superfície com menor valor de fator de segurança é o principal problema das análises de estabilidades e envolve um procedimento de testes até que a encontre. (SLOPE, 2011)

Existem dois principais métodos de pesquisa disponíveis no software: Grades e Raios e Entrada e Saída.

2.4.1. Grades e Raios

Em uma superfície crítica circular ela é um arco de círculo que corta a região do talude. Esse círculo pode ser especificado por coordenadas X e Y do centro e seu raio. As grades acima do talude são as de centro de rotação e cada ponto dela é o centro de um círculo para o teste da superfície. Já os raios, presentes na parte inferior do talude, representam tanto os raios quanto as linhas tangentes desse círculo teste, uma vez que o programa busca a distância perpendicular entre eles e os pontos da grade, vide Figura 21.

Figura 21: Opção de grades e raios.



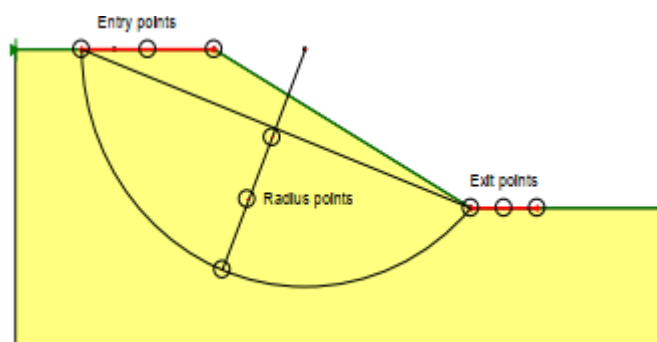
Fonte: Slope (2021)

2.4.2. Entrada e Saída

Uma das dificuldades do método anterior é a visualização das extensões da superfície analisada. Essa limitação pode ser superada a partir do método de entrada e saída, no qual é definido exatamente por onde as superfícies entram e por onde elas saem. O número de entradas e de saídas pode ser especificado como o número de incrementos ao longo das duas linhas (SLOPE, 2021).

Nesse método, são conectados pontos da linha de entrada com pontos da linha de saída. No ponto médio dessa reta formada, é criado uma linha perpendicular para formar um terceiro ponto de um círculo, sendo os pontos dessa linha todos os possíveis raios analisados, vide Figura 22.

Figura 22: Esquemática da superfície por Entrada e Saída



Fonte: Slope (2021)

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Neste capítulo são abordadas a metodologia para o desenvolvimento do presente estudo, as ferramentas utilizadas na análise de estabilidade de taludes, as principais características e propriedades de um talude de aterro hipotético, a geometria base de análise e o fator de segurança.

3.1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de reunir e compreender o estudo acerca da estabilidade de um talude, pretende-se com este projeto de graduação responder questões como essas:

- Quais parâmetros impactam mais ou menos para a determinação do FS?
- Os métodos menos rigorosos são de fato representativos?
- Até que ponto a divisão do talude em fatias é interessante e significativa a ponto de não onerar o cálculo?

A estruturação do estudo de caso possibilitou avançar com a análise dos elementos investigados da seguinte forma:

- Influência dos parâmetros na determinação do FS, exclusivamente pelo software Slope/W®, pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern & Price;
- Validação da planilha eletrônica frente ao recurso oferecido pelo mercado, software Slope/W®;
- Influência da discretização na obtenção de FS, pelo Slope/W®;

A terceira e última etapa consistiu na interpretação dos dados obtidos a partir dos cálculos e simulações com o software, confrontando os valores obtidos, com auxílio de ferramentas gráficas, como gráficos e tabelas.

3.2. DEFINIÇÃO DO SOFTWARE E MÉTODO DE ANÁLISE

Com relação aos programas utilizados, as análises de estabilidade foram realizadas utilizando o programa Slope/W® e uma planilha de Excel. Para o

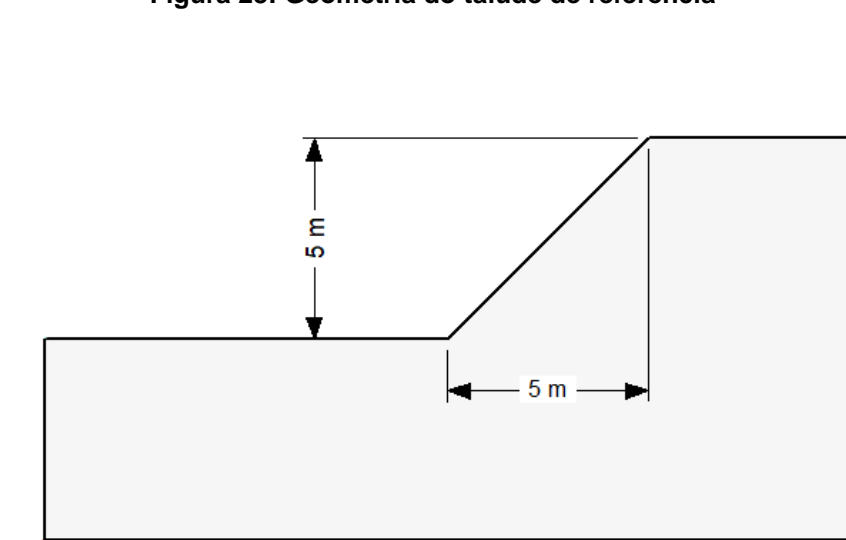
desenvolvimento foram adotados três métodos de análise, são eles: Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern & Price

Para o software foi necessário definir configurações de convergência e otimização, como a quantidade de fatias e o número de iterações que se deseja. Em relação às características da superfície de ruptura, foi escolhida a superfície circular, que ocorre da parte alta para a baixa, da direita para a esquerda.

3.3. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO CORPO DE ATERRO

Posteriormente à definição do método, estabeleceu-se um talude de referência, com geometria fixa, conforme observa-se na Figura 23. O talude, em questão, é formado por um tipo único de solo, homogêneo e isotrópico, e o nível freático inicial é considerado abaixo do pé do talude, em profundidade abaixo da superfície potencial de ruptura.

Figura 23: Geometria do talude de referência



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, foram definidos os parâmetros iniciais, conforme Tabela 4, de entrada do software e os parâmetros subsequentes, que sofreram variações para cumprimento de uma das análises propostas pelo presente estudo, prezando por grandezas representativas.

Tabela 4 Parâmetros do talude de referência

Parâmetros geotécnicos	
c' (kN/m ²)	10
φ' (°)	35
γ (kN/m ³)	18
Parâmetros geométricos	
h (m)	5
L (m)	5

Fonte: Autor (2022)

É interessante ressaltar que, para a definição dos parâmetros, o cenário ideal seria a existência de sondagens à percussão e/ou mista, juntamente com resultados de ensaios.

3.4. FATOR DE SEGURANÇA

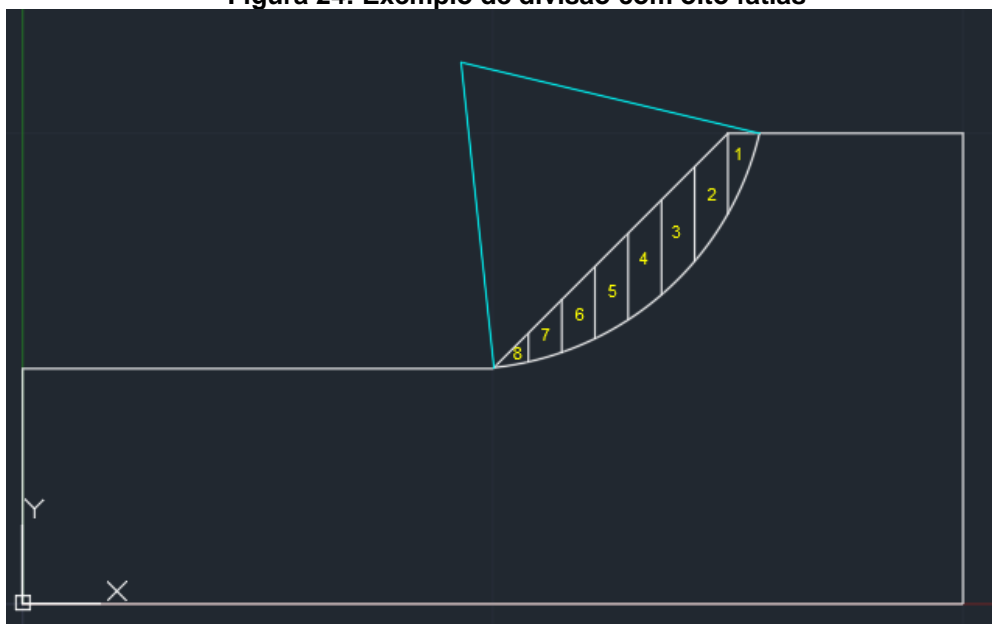
O fator de segurança de referência é o que atende às exigências da NBR 11.682/2009, definido conforme o nível de segurança contra danos materiais e ambientais e o nível de segurança contra danos a vidas humanas (Tabela 3). O software entrega, ao final da análise, um valor que será comparado com o mínimo atribuído. Neste trabalho, o nível de segurança contra danos a vidas humanas e contra danos materiais e ambientais são altos, por isso, estabelece-se como mínimo FS=1,5.

3.5. VALIDAÇÃO DO USO DA TABELA DE CÁLCULO

A partir de uma planilha eletrônica o talude base deste estudo foi calculado pelos métodos de Fellenius e Bishop Simplificado e os resultados confrontados com os obtidos pelo software Slope/W®, para os mesmos dois métodos.

O início da análise é feito com o desenho da ruptura circular em um ponto do talude. Como dito na seção anterior, é feita uma análise da direita para a esquerda, uma vez que a tendência de ruptura ocorre nesse mesmo sentido. Ao desenhar esse círculo do AutoCad, é feita a divisão das fatias, adotando o valor de 8, a fim de facilitar o cálculo da área, da largura e da altura de cada uma delas (Figura 24).

Figura 24: Exemplo de divisão com oito fatias



Fonte: Autor (2022)

Com as fatias divididas, basta retirar do desenho, com auxílio do AutoCAD, a área, a largura, a altura e o ângulo com a vertical, com os quais é calculado fator de segurança de Fellenius e Bishop Simplificado nas tabelas indicadas na seção 2.3.1.

Em primeiro momento, é feito o cálculo do FS através da divisão feita e encontra-se um valor diferente daquele indicado pelo programa. Isso porque são infinitas as cunhas de rupturas possíveis e apenas uma delas é caracterizada como a crítica. Chegar nessa cunha demanda diversas tentativas, o que, a mão, pode se tornar uma tarefa demorada. A fim de facilitar a conferência, o Slope/W® fornece os valores do círculo responsável por essa superfície crítica que foram utilizados nos cálculos da tabela (Figura 25).

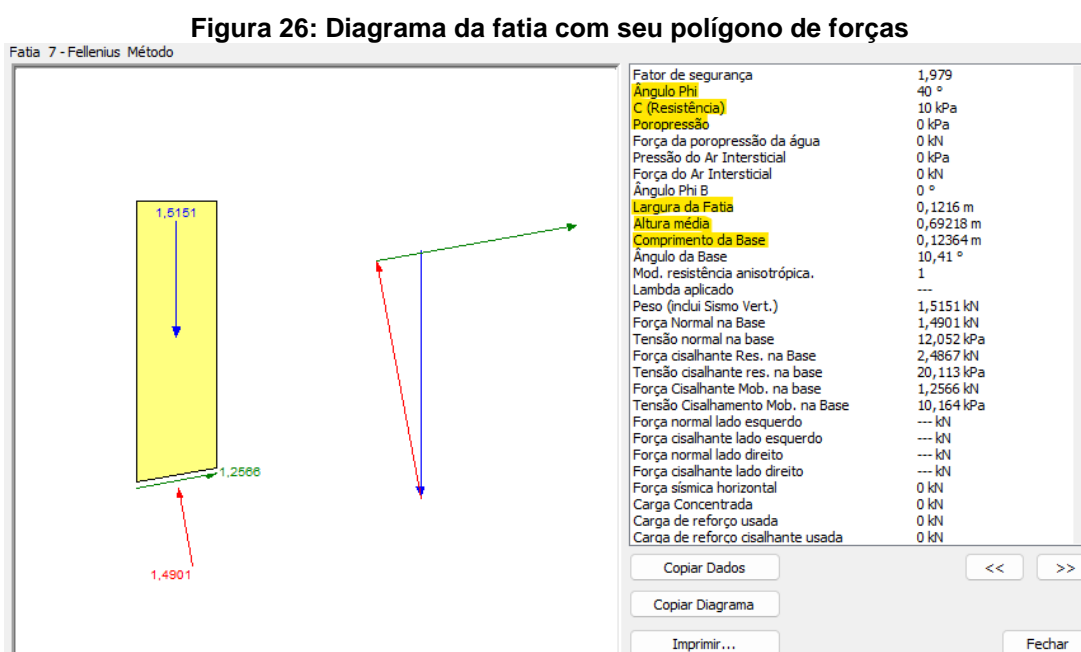
Figura 25: Informações do círculo da superfície crítica no Slope/W®

Superfície #	FS	Centro X (m)	Centro Y (m)	Raios (m)	Detalhes
3.563	1,808	9,6967	12,295	7,2967	Crítica (anál)
3.562	1,811	9,3774	12,746	7,7486	

Fonte: Autor (2022)

Em seguida, encontram-se outras barreiras na comparação, uma vez que a divisão de fatias na superfície de ruptura pode ser de um formato diferente do utilizado no software, gerando outros valores de entrada da tabela e conseqüentemente um valor de FS diferente do valor crítico.

Ao adequar todos os valores de entrada com os utilizados pelo software, é possível chegar ao mesmo valor de FS, confirmando a convergência de resultados, tanto no método de Fellenius, quanto no de Bishop. Os valores de entrada são: os parâmetros geotécnicos apresentados na seção 3.3, juntamente com a altura média da fatia, a largura da fatia, a poropressão e o ângulo da fatia com a base. Esses valores são adquiridos nas informações de cada fatia, apresentadas como o exemplo da Figura 26.



Fonte: Autor (2022)

3.6. DISCRETIZAÇÃO NO CÁLCULO DO FS

Realizou-se uma análise, para o caso inicial, a partir da variação do número de fatias, pelo Software, a fim de compreender a influência da discretização no cálculo do FS. Os valores adotados estão exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 Valores adotados para análise da influência do número de fatias

nº de fatias
8
12
18
30
50
100

Fonte: Autor (2022)

3.7. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para os métodos descritos no tópico 2.2 *MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE* propôs-se a variação dos parâmetros de:

- coesão (c')
- ângulo de atrito (ϕ')
- peso específico (γ)

A Tabela 6 relaciona os valores adotados para análise do FS:

Tabela 6 Parâmetros adotados

Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Peso específico (kN/m³)
0	18	13
5	28	15
10	35	17
20	40	18
25	-	19
-	-	21

Fonte: Autor (2022)

Com o intuito de avaliar a influência de um parâmetro por vez, a variação de um dos parâmetros ocorre com os demais constantes. A faixa de variação proposta buscou contemplar o efeito de possíveis incertezas na determinação dos parâmetros, desde valores típicos de solos grossos a valores típicos de solos finos, podendo também representar uma variação espacial dos parâmetros do solo do talude.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados de estabilidade de um talude hipotético obtidos para as análises propostas, no capítulo anterior.

4.1. VALIDAÇÃO DO USO DA TABELA DE CÁLCULO

Os fatores de segurança encontrados para o Método de Fellenius e Bishop Simplificado através da planilha de cálculo estão apresentados a seguir, Figura 27 e Figura 28, sendo estes determinados para o caso base (vide Tabela 4).

Figura 27: Resultados pela planilha eletrônica - Fellenius

Análise de Estabilidade pelo Método de Fellenius

yt (kN/m ³)	18
c' (kPa)	10
φ' (graus)	35
φ' (rad)	0,61

Fatia	Área (m ²)	hi (m)	bi(m)	u (kPa)	θ' (°)	θ' (rad)	Wi (kN/m)	N'i (kN/m)	Numerador de FS		Denominador de FS	
									Fri	Wi.senθi	Fri	Wi.senθi
1	0,311848	0,37461	0,83246	0	5,7099	0,0996566	5,6132611	5,5854103	12,27705576		0,558472789	
2	0,894395	1,0744	0,83246	0	12,344	0,2154434	16,09911	15,726926	19,53371739		3,44167814	
3	1,391207	1,6712	0,83246	0	19,154	0,3343004	25,041729	23,655421	25,3761609		8,216400219	
4	1,792869	2,1537	0,83246	0	26,263	0,4583758	32,271644	28,940318	29,54707536		14,2799498	
5	2,082482	2,5016	0,83246	0	33,848	0,590759	37,484675	31,131702	31,82203398		20,87864842	
6	2,228912	2,6775	0,83246	0	42,203	0,7365813	40,12041	29,719973	32,04792383		26,95126142	
7	1,786105	2,2011	0,81146	0	51,776	0,9036617	32,149883	19,892339	27,04353517		25,25687683	
8	0,684045	0,84298	0,81146	0	64,298	1,1222118	12,312802	5,3399457	22,44964676		11,09459648	
									Soma	200,0971491		110,6778841
				FS	1,807924	Calculado						

Fonte: Autor (2022)

Figura 28: Resultados pela planilha eletrônica – Bishop Simplificado

Análise de Estabilidade pelo Método de Bishop

yt (kN/m ³)	18
c' (kPa)	10
φ' (graus)	35
φ' (rad)	0,61

FS	1,882	Arbitrado
----	-------	-----------

Fatia	Área (m ²)	h(i)	bi(m)	u (kPa)	θ' (°)	θ' (rad)	Wi (kN/m)	N'i (kN/m)		Numerador de FS		Denominador de FS	
								Numerador	Denominador	N'i (kN/m)	Fri	Wi.senθi	Wi.senθi
1	0,26741	0,32158	0,83155	0	12,764	0,2227738	4,8133773	3,90905095	1,084283025	3,60519427	11,05058045	1,063447118	
2	0,767005	0,92238	0,83155	0	18,182	0,3173358	13,806092	13,0042202	1,122195959	11,5881902	16,86664992	4,308003958	
3	1,192609	1,4342	0,83155	0	23,776	0,4149695	21,466962	21,3307821	1,163909686	18,3268362	21,91928964	8,654663483	
4	1,535208	1,8462	0,83155	0	29,625	0,5170538	27,633737	28,8988402	1,211571447	23,8523615	26,26757342	13,65994225	
5	1,780265	2,1409	0,83155	0	35,842	0,6255609	32,044777	35,5933064	1,268749354	28,0538519	29,90152864	18,7638852	
6	1,904083	2,2898	0,83155	0	42,602	0,7435452	34,273497	41,0424402	1,342146094	30,5797114	32,70925056	23,19978743	
7	1,491301	1,8378	0,81146	0	50,114	0,8746543	26,843421	33,8147773	1,445193817	23,3980916	29,03762718	20,59754415	
8	0,548652	0,67613	0,81146	0	59,033	1,0303202	9,8757441	5,22893097	1,620012133	3,22771099	18,03052709	8,468093052	
									Soma	185,7830269		98,71536665	
				FS	1,882007	Calculado							

Fonte: Autor (2022)

Pelos mesmos dois métodos, com o software Slope/W®, os resultados foram idênticos, conforme observado na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados obtidos pelo software x planilha

Inclinação 1:1								
Teste	Nº de fatias	FS		Método	Observação	Raio	Centro	
		Programa	Planilha				X	Y
5	8	1,808	1,808	Fellenius	Coesão=10	6,8226	9,572	11,823
6	8	1,882	1,882	Bishop	Coesão=10	7,4312	9,3724	12,407

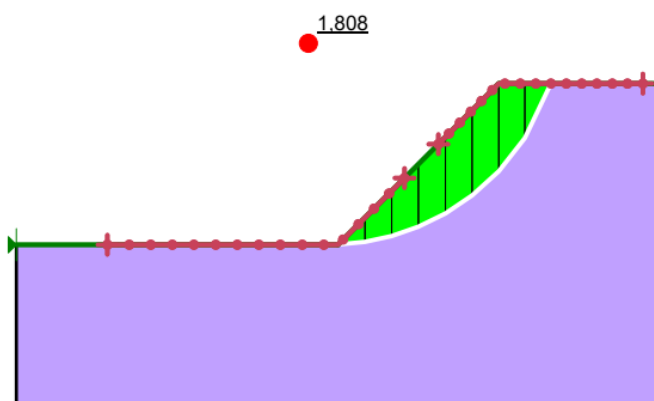
Fonte: Autor (2022)

A partir de aproximadamente 30 fatias, é possível considerar que o método manual se torna cada vez menos funcional devido a quantidade de fatias em um pequeno espaço para pouca variação no valor do fator de segurança, o que levaria um tempo maior para o cálculo, apesar da variação entre os valores de entrada tenderem a diminuir.

A seguir, Figura 29 e Figura 30, apresenta-se a curva de ruptura do talude base gerado pelo Slope/W®:

Figura 29: Curva de ruptura – Fellenius

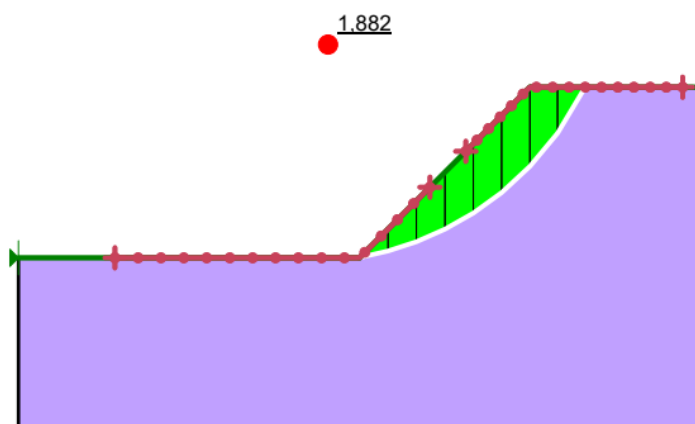
Fellenius - Caso Base



Fonte: Autor (2022)

Figura 30: Curva de ruptura – Bishop Simplificado

Bishop - Caso Base

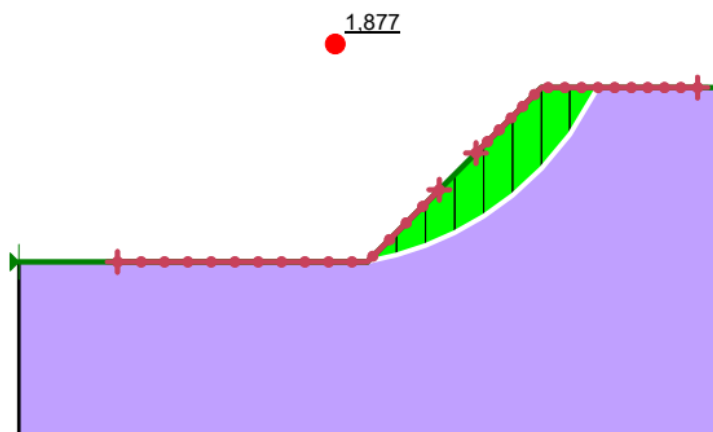


Fonte: Autor (2022)

Para comparar com os resultados do programa e exemplificar as diferenças, antecipa-se e apresenta-se na Figura 31 a curva referente ao método de Morgenstern-Price.

Figura 31: Curva de ruptura – Morgenstern-Price

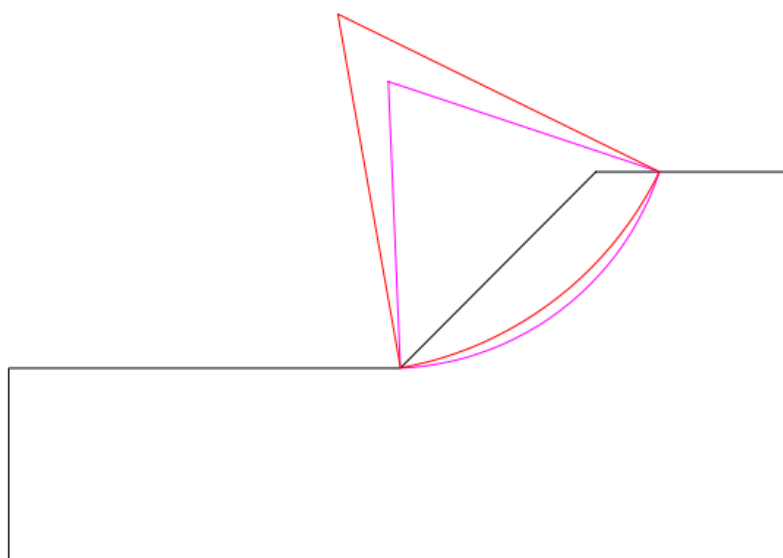
Morgenstern Price - Caso Base



Fonte: Autor (2022)

Visualmente as curvas apresentam semelhança, principalmente para Bishop Simplificado e Morgenstern-Price. Para melhor visualizar, foi gerado um desenho com as três curvas, Figura 32, a linha vermelha representa Bishop Simplificado e Morgenstern-Price, curvas praticamente sobrepostas, e a curva rosa a de Fellenius.

Figura 32: Curvas de ruptura para os três métodos



Fonte: Autor (2022)

Estudou-se a possibilidade de considerar um cenário hipotético e conservador, em que a superfície freática coincidissem com a superfície do talude com o objetivo de verificar o efeito sobre a estabilidade. Os resultados das simulações são observados

na Tabela 8, na qual comparam-se os valores obtidos por meio do Slope/W® para o caso com poropressão nula e com poropressão positiva, calculada de maneira hidrostática, considerando o talude do caso base (vide Tabela 4). Neste cenário, o software calcula a poropressão através da linha piezométrica, em que o seu valor é obtido pelo cálculo da altura do ponto médio da base da fatia até a linha piezométrica multiplicada pelo peso específico da água.

Tabela 8: Valores de FS encontrados pelo Slope/W®

Inclinação 1:1				
Condição	Nº de fatias	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Não saturada	8	1,808	1,882	1,887
Saturada	8	1,249	1,016	1,022

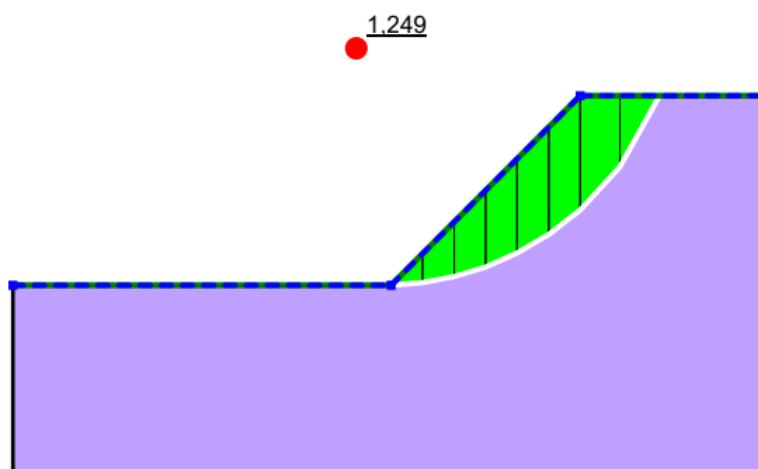
Fonte: Autor (2022)

Inúmeros são os efeitos que a água pode exercer sobre um maciço: aumento do peso específico do material, aumento da poropressão e consequente diminuição da tensão efetiva, forças de percolação, subpressão e outros (GERSCOVICH, 2009, apud ORIGE, 2013). Nota-se que a água foi realmente um fator responsável por levar o talude estudado à instabilidade, ao reduzir o FS, para os três métodos, de modo considerável.

A Figura 33, Figura 34 e Figura 35 exibem a curva de ruptura para a condição saturada e o FS obtido.

Figura 33: Curva de ruptura condição saturada – Fellenius

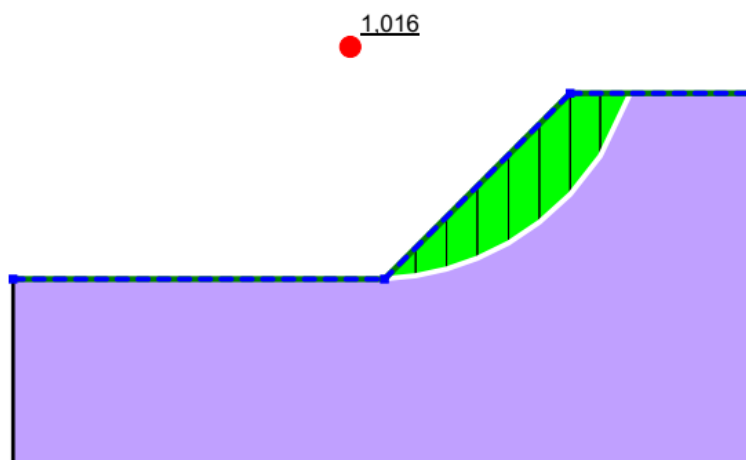
Fellenius - Caso Base com água



Fonte: Autor (2022)

Figura 34: Curva de ruptura condição saturada – Bishop Simplificado

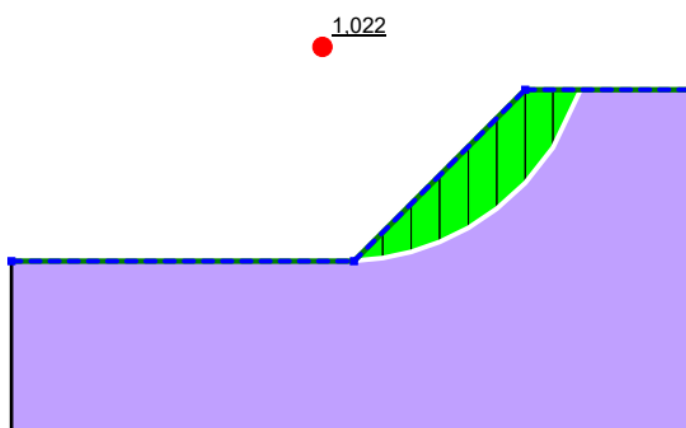
Bishop - Caso Base com água



Fonte: Autor (2022)

Figura 35: Curva de ruptura condição saturada – Morgenstern-Price

Morgenstern-Price - Caso Base com água



Fonte: Autor (2022)

4.2. DISCRETIZAÇÃO NO CÁLCULO DO FS

Em seguida, foi feito um comparativo de quantidade de fatias a fim de entender quantas são necessárias para chegar em um valor de FS de baixa variação entre si, mas com poucas divisões de forma a precisar de menos iterações no programa.

A Tabela 9 mostra um comparativo do FS para cada situação com fatias diferentes a serem utilizadas, nos três métodos apresentados. Em relação à quantidade de fatias, a variação do FS só passa a ser de valor menos significativo a partir de 50 fatias, uma vez que a partir dela as três primeiras casas decimais continuam as mesmas. A partir disso, entende-se o motivo de o programa utilizar uma

divisão da superfície com 30 fatias no seu modelo geral para todos os métodos de cálculo, já que a diferença é apenas na terceira casa decimal em uma variação pouco significativa em valor, mas com um melhoramento de desempenho do software devido à redução de iterações necessárias.

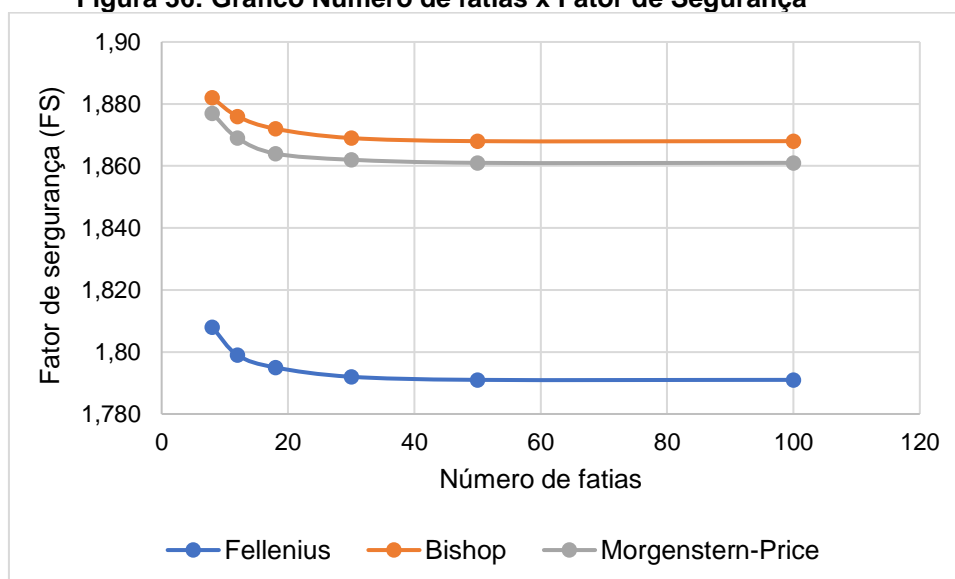
Tabela 9: Resultado do Fator de Segurança através da variação do número de fatias

Método	Nº de fatias					
	8	12	18	30	50	100
Fellenius	1,808	1,799	1,795	1,792	1,791	1,791
Bishop	1,882	1,876	1,872	1,869	1,868	1,868
Morgenstern-Price	1,877	1,869	1,864	1,862	1,861	1,861

Fonte: Autor (2022)

Ademais, é possível fazer uma comparação entre os métodos, sendo o método de Fellenius o que se mostra muito conservador, o que, em uma situação de projeto, pode levar, por exemplo, a uma suavização da inclinação do talude, exigindo maior área de ocupação (e, conseqüentemente, desapropriação) e maior volume de movimentação de terra. Essa análise também converge com a literatura já que o método de Bishop, apesar de ser menos conservador e de não considerar a interação entre fatias, apresentou valores muito próximos aos de Morgenstern-Price, que é considerado um método avançado e mais rigoroso, confirmando a afirmação de DUNCAN E WRIGHT (1980). A Figura 36 apresenta as três curvas que relacionam o número de fatias com o fator de segurança, observa-se a partir da divisão em 50 fatias uma tendência de constância e estabilização da variação.

Figura 36: Gráfico Número de fatias x Fator de Segurança



Fonte: Autor (2022)

A maior variação do FS é de 0,017 (1,808 para 1,791), um valor relativamente baixo, que pode ser considerado desprezível, uma vez que estão acima do fator de segurança mínimo de 1,5, principalmente ao considerar as incertezas envolvidas no processo de análise de estabilidade de um talude.

No entanto, o estudo da análise de estabilidade possui diversas incertezas associadas, como o processo de obtenção dos parâmetros, a variabilidade espacial dos parâmetros e os próprios métodos. Seria um preciosismo muito grande apresentar o valor do FS com mais de uma casa decimal, e dessa forma, pode-se considerar que a quantidade de 8 fatias proporciona nível adequado de precisão para o estudo proposto, dispensando o desenvolvimento com números altos de fatias.

4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

A variação separadamente dos parâmetros: coesão, ângulo de atrito e peso específico permitiu verificar diferenças entre os métodos e a influência dos parâmetros. Com o software Slope/W®, obteve-se, para os métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Morgenstern-Price os valores de FS descritos a seguir.

Os valores dos parâmetros geotécnicos utilizados foram os mesmos apresentados no caso base, isto é, coesão de 10kPa, ângulo de atrito de 35° e peso específico de 18kN/m³. Além disso, como apresentado na seção anterior que a partir de 50 fatias o valor de FS é estabilizado, foi utilizada essa quantidade para a análise paramétrica apresentadas abaixo.

4.3.1. Coesão

A aplicação dos diferentes valores de coesão em cada um dos três métodos resultou em diferentes valores de FS para o talude.

- MÉTODO DE FELLENIUS

Com base nos resultados obtidos, Tabela 10, na variação da coesão de 0 kPa até 25 kPa, é possível concluir que seu valor influencia diretamente no aumento do fator de segurança de estabilidade de um talude à medida que é aumentada.

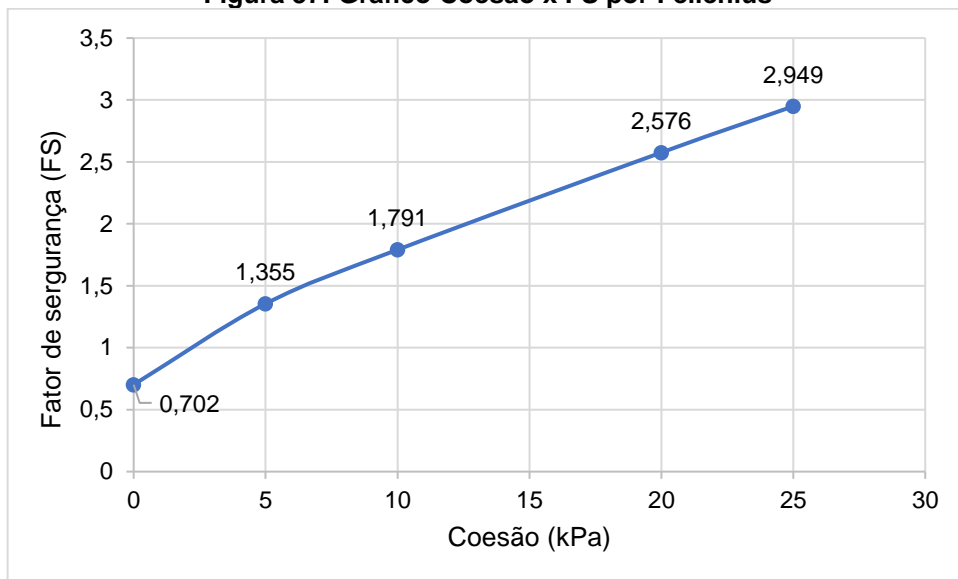
O aumento do fator de segurança na variação de 0 para 5kPa é o maior, chegando a 93,02%, como é visto na Figura 37.

Tabela 10: Resultados para variação da coesão – Fellenius

Coesão (kPa)	FS
0	0,702
5	1,355
10	1,791
20	2,576
25	2,949

Fonte: Autor (2022)

Figura 37: Gráfico Coesão x FS por Fellenius



Fonte: Autor (2022)

- MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

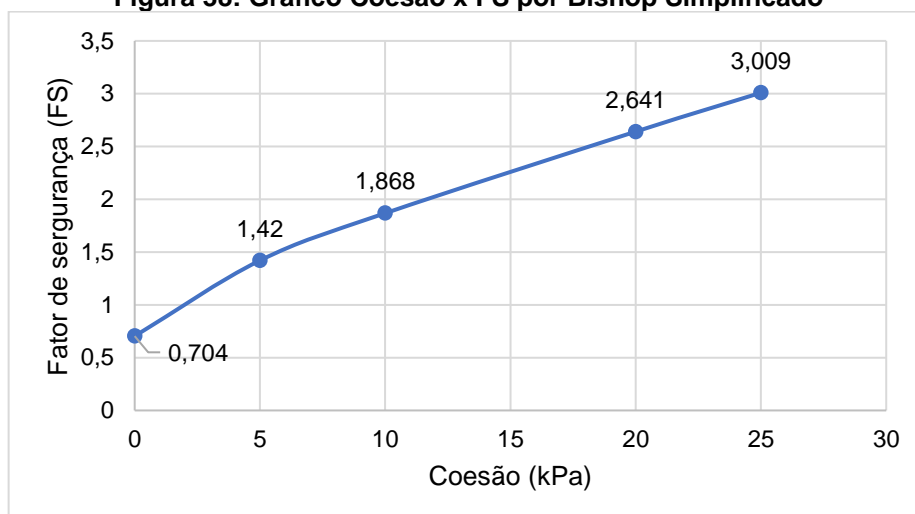
Como esperado, os resultados obtidos com o aumento da coesão utilizando-se o método de Bishop Simplificado também mostram um crescimento da estabilidade e, portanto, do fator de segurança conforme mostrado na Tabela 11 e Figura 38.

Tabela 11: Resultados para variação da coesão – Bishop Simplificado

Coesão (kPa)	FS
0	0,704
5	1,42
10	1,868
20	2,641
25	3,009

Fonte: Autor (2022)

Figura 38: Gráfico Coesão x FS por Bishop Simplificado



Fonte: Autor (2022)

- MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

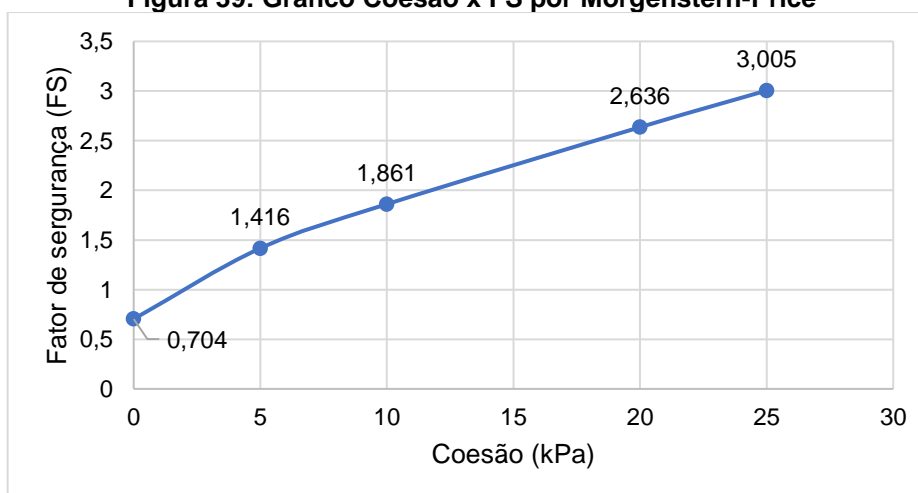
Tal como os dois métodos anteriores, ocorre uma mudança na estabilidade à medida que é feito o aumento do valor da coesão do solo, com um aumento mais significativo nos primeiros valores adotados, como visto na Tabela 12 e Figura 39.

Tabela 12: Resultados para variação da coesão – Morgenstern-Price

Coesão (kPa)	FS
0	0,704
5	1,416
10	1,861
20	2,636
25	3,005

Fonte: Autor (2022)

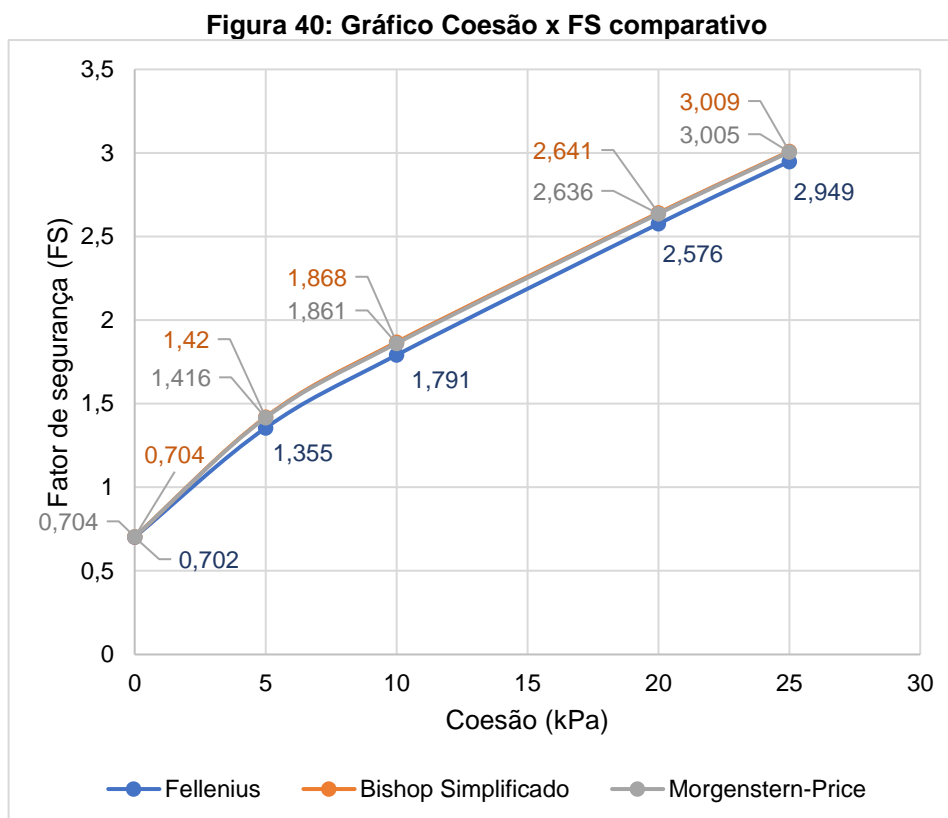
Figura 39: Gráfico Coesão x FS por Morgenstern-Price



Fonte: Autor (2022)

- COMPARATIVO

A Figura 40 reúne as curvas de Coesão x FS pelos métodos de Bishop Simplificado, Fellenius e Morgenstern-Price. Observa-se que, entre as curvas obtidas, há semelhança dos resultados pelos métodos de Bishop e de Morgenstern-Price. Já a curva por Fellenius fornece valores de FS ligeiramente diferentes, porém com comportamento semelhante à de Bishop e de Morgenstern-Price.



Fonte: Autor (2022)

Ao calcular a variação entre os intervalos – vide no apêndice a Tabela 19, a Tabela 20 e a Tabela 21 – nota-se que a coesão tem uma influência significativa sobre o valor de FS. A maior diferença ocorreu no intervalo de 0 kPa para 5 kPa, alcançando cerca de 50% de aumento. Para valores de coesão acima de 10kPa, uma variação de 5 kPa na coesão pode provocar até 30% de variação no valor do FS. Nos casos em que o FS está próximo ao mínimo estabelecido por norma, é importante avaliar o impacto de uma possível redução da coesão sobre a estabilidade do talude.

4.3.2. Ângulo de atrito

- MÉTODO DE FELLENIUS

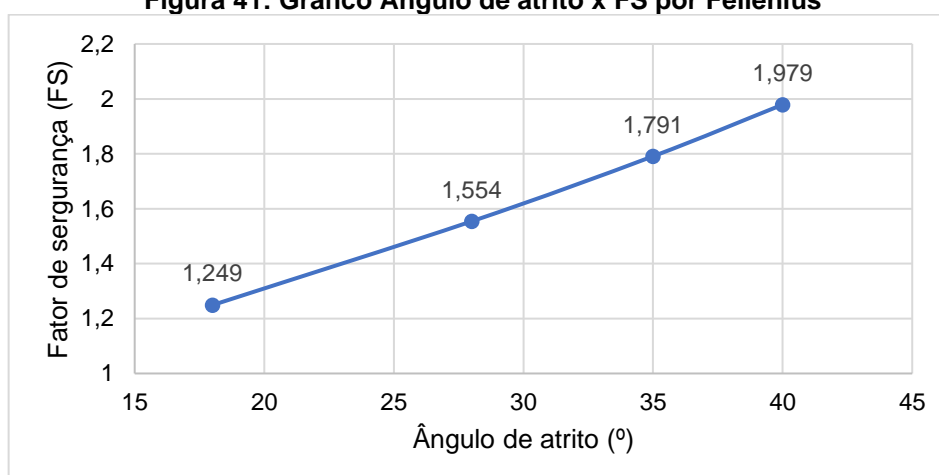
Tal como na variação da coesão, o valor do ângulo de atrito influencia diretamente no aumento do fator de segurança de estabilidade de um talude à medida que é aumentada, como é visto na Tabela 13 e na Figura 41.

Tabela 13: Resultados para variação do ângulo de atrito – Fellenius

Ângulo de Atrito (°)	FS
18	1,249
28	1,554
35	1,791
40	1,979

Fonte: Autor (2022)

Figura 41: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Fellenius



Fonte: Autor (2022)

A maior variação encontrada ocorre na mudança de ângulo de atrito zero para 10° com aumento de 54%.

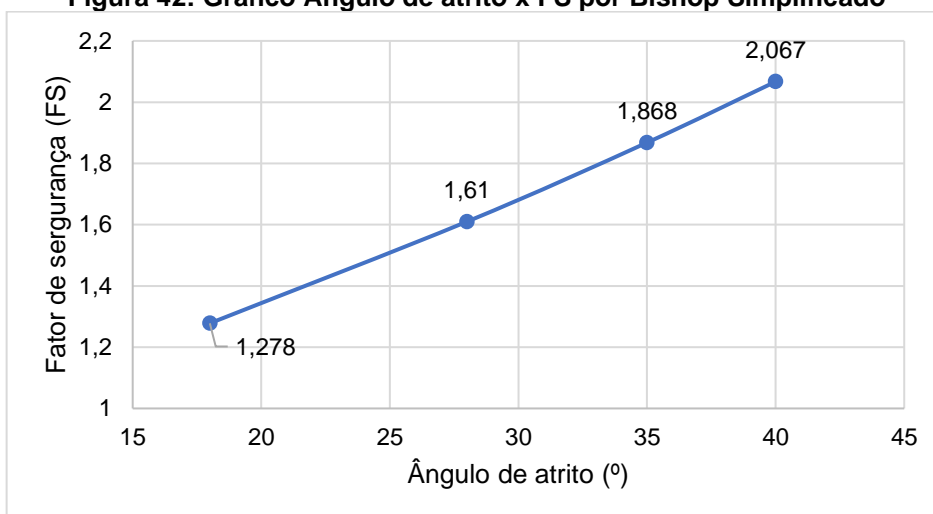
- MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

Também ocorre o aumento do FS à medida que se aumenta o ângulo de atrito. É no método de Bishop que ocorre a maior variação do FS, com 57%, também na mudança de 0° para 10°, como é visto na Tabela 14 e na Figura 42.

Tabela 14: Resultados para variação do ângulo de atrito – Bishop Simplificado

Ângulo de Atrito	FS
18	1,278
28	1,61
35	1,868
40	2,067

Fonte: Autor (2022)

Figura 42: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Bishop Simplificado

Fonte: Autor (2022)

- MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

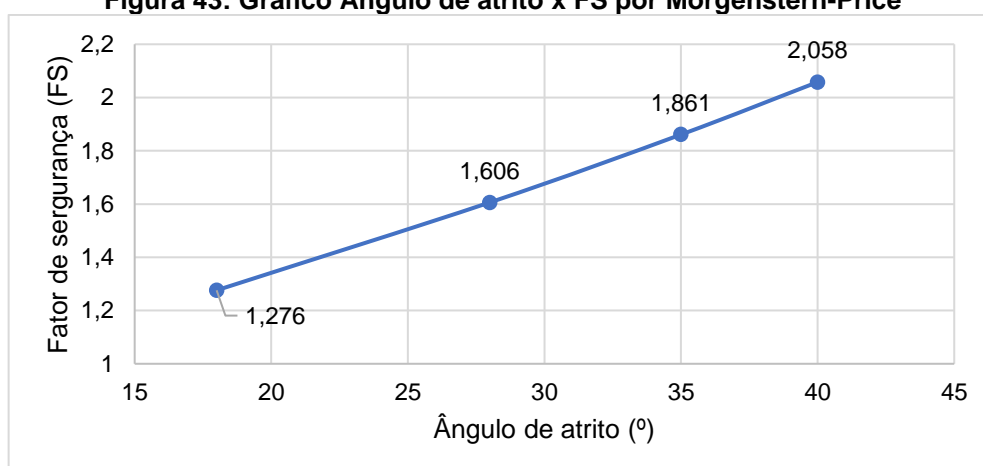
Por fim, o mesmo acontece no método de Morgenstern-Price, como já esperado visto os resultados anteriores. Ocorre o aumento do FS conforme mostrado na Tabela 15 e na Figura 43.

Tabela 15: Resultados para variação do ângulo de atrito – Morgenstern-Price

Ângulo de Atrito	FS
18	1,276
28	1,606
35	1,861
40	2,058

Fonte: Autor (2022)

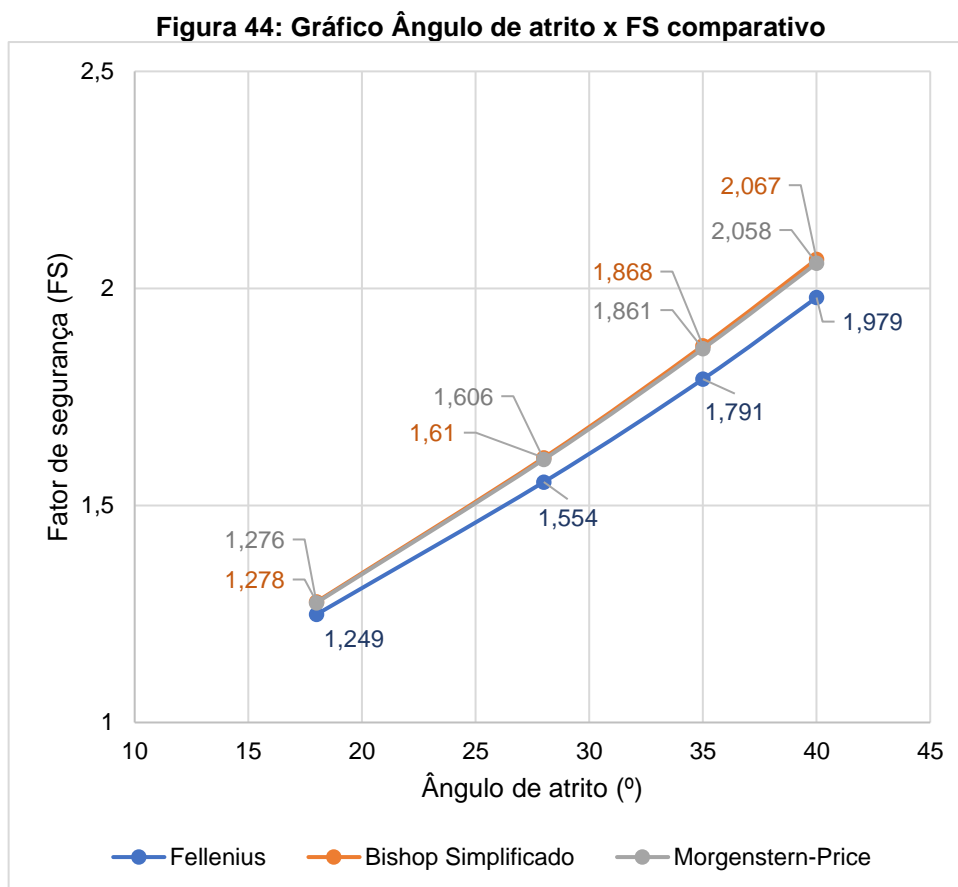
A maior variação encontrada ocorre na mudança de ângulo de atrito zero para 10° com aumento de 54%.

Figura 43: Gráfico Ângulo de atrito x FS por Morgenstern-Price

Fonte: Autor (2022)

- COMPARATIVO

A Figura 44 reúne as curvas de *Ângulo de atrito x FS* pelos métodos de Bishop Simplificado, Fellenius e Morgenstern-Price. Os métodos de Bishop e de Morgenstern-Price apresentam resultados semelhantes, com curvas praticamente sobrepostas. Já a curva por Fellenius fornece valores de FS ligeiramente diferentes, porém com uma curva de comportamento semelhante à de Bishop e de Morgenstern-Price.



Ao calcular a variação entre os intervalos – vide no apêndice a Tabela 22, a Tabela 23 e a Tabela 24 – nota-se que a influência relativa do ângulo de atrito sobre o FS é menor do que a da coesão. Para valores de ângulo de atrito superiores a 18°, uma variação de 5 graus no ângulo de atrito provoca variação inferior a 15% sobre o valor do FS. Nos casos em que o FS está próximo ao mínimo estabelecido por norma, é recomendável avaliar o impacto de uma possível redução do ângulo de atrito sobre a estabilidade do talude.

4.3.3. Peso específico

- MÉTODO DE FELLENIUS

Ao contrário dos parâmetros anteriores, o aumento do peso específico gera uma diminuição do fator de segurança, conforme Tabela 16. Com maior variação no aumento de 13kN/m^3 para 15kN/m^3 , com redução de quase 7% no FS.

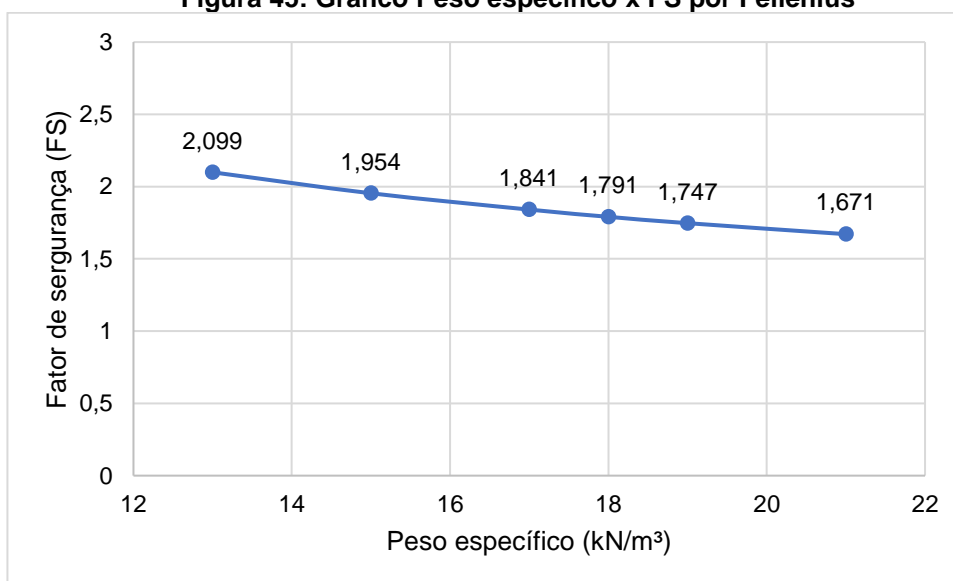
Tabela 16: Resultados para variação do peso específico – Fellenius

Peso Específico (kN/m^3)	FS
13	2,099
15	1,954
17	1,841
18	1,791
19	1,747
21	1,671

Fonte: Autor (2022)

A Figura 45 fornece uma visualização gráfica da redução do FS em relação ao aumento do peso específico:

Figura 45: Gráfico Peso específico x FS por Fellenius



Fonte: Autor (2022)

- METODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

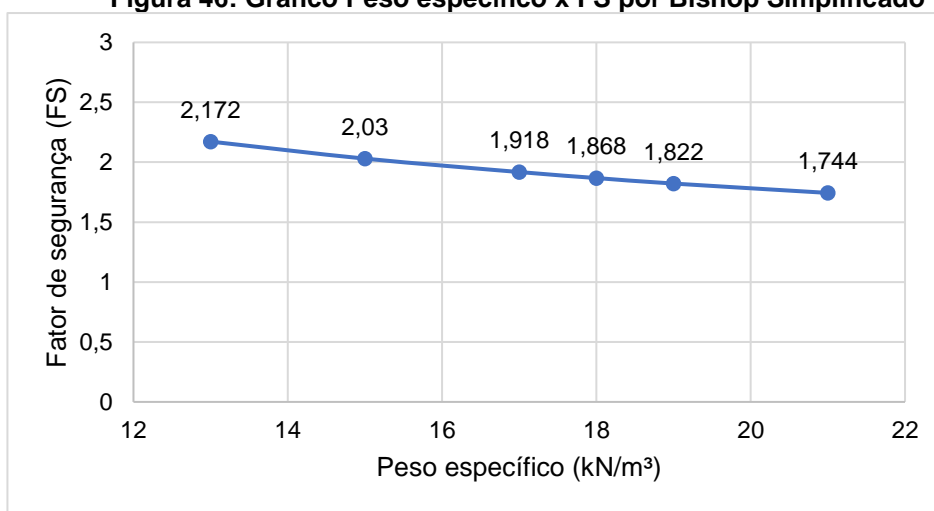
Assim como o método de Fellenius, ocorre uma diminuição do fator de segurança como é visto na Tabela 17 e na Figura 46.

Tabela 17: Resultados para variação do peso específico – Bishop Simplificado

Peso Específico (kN/m ³)	FS
13	2,172
15	2,03
17	1,918
18	1,868
19	1,822
21	1,744

Fonte: Autor (2022)

Figura 46: Gráfico Peso específico x FS por Bishop Simplificado



Fonte: Autor (2022)

- MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

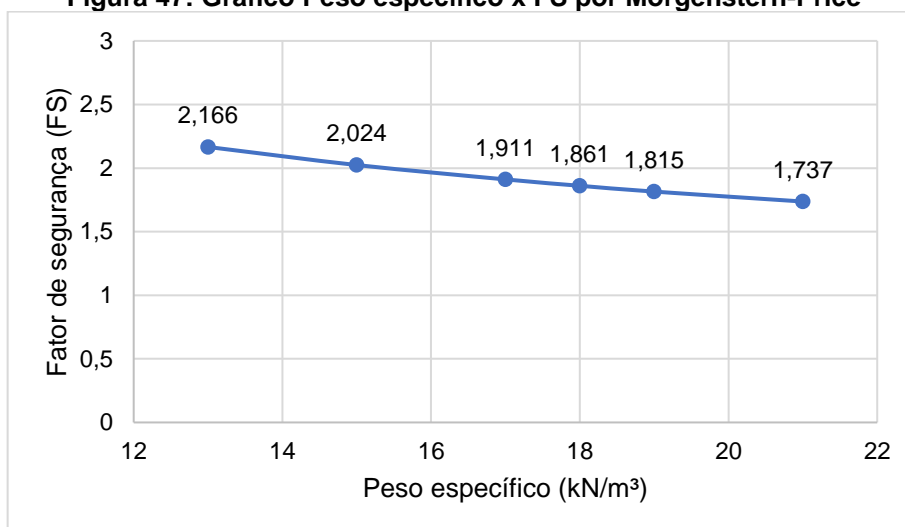
Como esperado, a partir do método de Morgenstern-Price o fator de segurança também reduz com o aumento do peso específico, como é visto na Tabela 18 e na Figura 47, variando de 6,5% a 2,6%.

Tabela 18: Resultados para variação do peso específico – Morgenstern-Price

Peso Específico (kN/m ³)	FS
13	2,166
15	2,024
17	1,911
18	1,861
19	1,815
21	1,737

Fonte: Autor (2022)

Figura 47: Gráfico Peso específico x FS por Morgenstern-Price

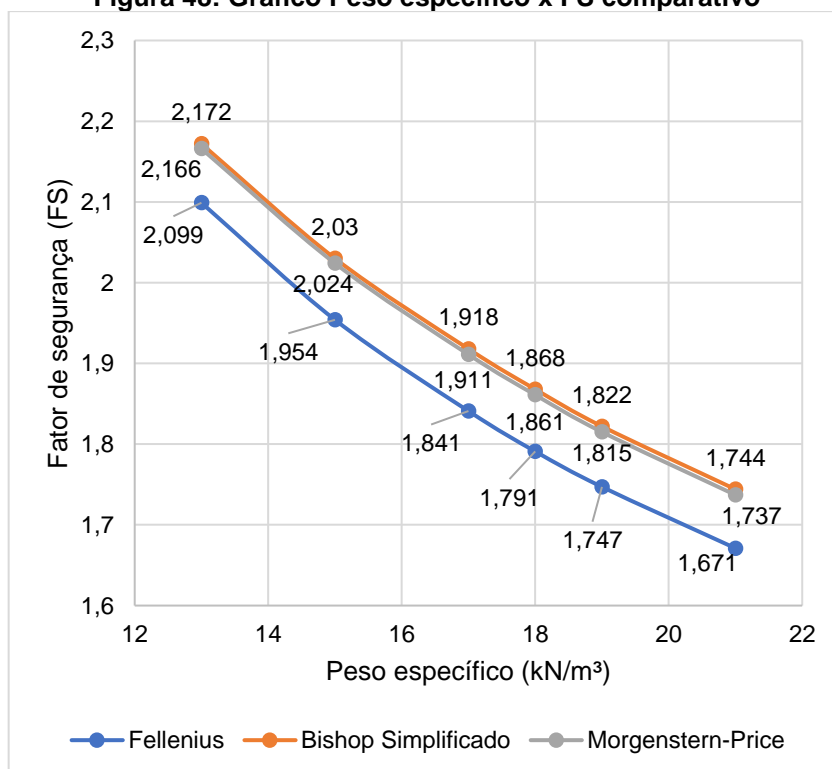


Fonte: Autor (2022)

- COMPARATIVO

A Figura 48 reúne as curvas de *Peso específico x FS* pelos métodos de Bishop Simplificado, Fellenius e Morgenstern-Price. Do gráfico, observa-se que os métodos de Bishop e de Morgenstern-Price apresentam resultados semelhantes, com curvas praticamente sobrepostas, e o método de Fellenius, por sua vez, apresenta valores distintos dos outros métodos, no entanto, com comportamento parecido.

Figura 48: Gráfico Peso específico x FS comparativo



Fonte: Autor (2022)

Nota-se que a influência relativa do peso específico sobre o FS é a menor entre os parâmetros analisados. Uma variação de 2 kN/m³ no peso específico provoca variação inferior a 7% sobre o valor do FS. Observa-se uma relação inversa entre o peso específico e o FS, isso porque a força peso atuante acima da cunha de ruptura aumenta à medida que o peso específico aumenta, atuando como um fator de instabilização, ou seja, favorável ao deslizamento da cunha.

Vale ressaltar que, nos casos em que o FS está próximo ao mínimo estabelecido por norma, o impacto de um possível aumento do peso específico é pouco significativo sobre a estabilidade do talude.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto de graduação buscou diferentes análises a fim de observar aspectos que influenciam na determinação do fator de segurança de um talude. A partir de um talude hipotético, homogêneo, comparou-se o FS obtido através de uma planilha eletrônica de cálculo, desenvolvida pelas autoras, com o fornecido pelo programa comercial Slope/W®, pelo método de Fellenius e Bishop Simplificado, e ainda observou-se a variação sob a ótica de um método mais rigoroso, o de Morgenstern-Price.

Para o estudo desenvolvido, os métodos manuais se mostraram representativos diante do recurso comercial escolhido. De modo que foi possível concluir que a formulação matemática empregada na elaboração da planilha apresentou resultados congruentes com os do Slope/W®.

Infere-se que, na aplicação de estudos iniciais, a planilha é uma ferramenta bem interessante. Entretanto, pouco funcional para a realização de análises paramétricas, por exigir tempo elevado dada a quantidade de iterações necessárias.

Em relação aos métodos, observou-se convergência entre os resultados de Bishop Simplificado – satisfaz apenas o equilíbrio de momentos – e Morgenstern-Price – satisfaz todas as condições de equilíbrio. Por Fellenius, o mais simples entre os abordados nesse projeto, os resultados de FS foram inferiores aos de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price.

No que diz respeito à avaliação da discretização, para o estudo de caso proposto, observou-se que divisão a partir de 8 fatias fornece nível adequado de precisão, validando a utilização de métodos manuais, uma vez que essa divisão ainda não onera tanto o cálculo. Para o método de Fellenius, a divisão em 8 fatias e 100 fatias resultou em valores de FS de 1,808 e 1,791, respectivamente. Para o método de Bishop Simplificado, a divisão em 8 fatias e 100 fatias resultou em valores de FS de 1,882 e 1,868, respectivamente. E para o método de Morgenstern-Price, a divisão em 8 fatias e 100 fatias resultou em valores de FS de 1,877 e 1,861, respectivamente

Utilizando-se uma casa decimal, observa-se que qualquer uma das divisões de fatias maior ou igual a 8 já fornece valores constantes. Para Fellenius, FS=1,8; para Bishop Simplificado, FS=1,9; e para Morgenstern-Price, FS=1,9.

Da verificação da influência dos parâmetros de coesão, ângulo de atrito e peso específico na estabilidade do talude proposto para o estudo de caso, observou-se que a coesão teve a maior influência sobre o FS e o peso específico, a menor.

Para valores de coesão acima de 10kPa, uma variação de 5 kPa na coesão pode provocar até 30% de variação no valor do FS. Para valores de ângulo de atrito superiores a 18°, uma variação de 5 graus no ângulo de atrito provoca variação inferior a 15% sobre o valor do FS. Uma variação de 2 kN/m³ no peso específico provoca variação inferior a 7% sobre o valor do FS.

Nos casos em que o FS está próximo ao mínimo estabelecido por norma, é recomendável avaliar o impacto de uma possível redução dos parâmetros de resistência sobre a estabilidade do talude.

O estudo contemplou a análise da influência da poropressão hidrostática para o cenário hipotético de superfície freática coincidente com a superfície do talude. Observou-se significativa influência sobre o FS, sendo proporcionalmente menor quando utilizado o método de Fellenius. Para esse método o FS caiu de 1,808 para 1,249; para o método de Bishop Simplificado, caiu de 1,882 para 1,016; e para o método de Morgenstern-Price, caiu de 1,887 para 1,022. Nota-se que o método de Fellenius foi o menos conservador para o cenário hipotético de solo com poropressão positiva.

Face ao exposto, conclui-se que é importante realizar uma análise paramétrica nos projetos que envolvem estabilidade de taludes, em especial, com os parâmetros de resistência do solo e com a posição da superfície freática.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

BONA, C. D.; OLIVEIRA, R. B. **Modelo Geológico-Geotécnico e Análise de Estabilidade de Talude no Município de Alegre**. Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6.ed., Rio de Janeiro: LTC, 1998.

FERREIRA, João Luís Ferrás. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PELOS MÉTODOS DE JANBU E SPENCER**. Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2011/2012 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

GEOSLOPE. **Stability Modeling with Geostudio**. Canada, 2022. Disponível em: <http://www.geoslope.com>. Acesso em 02/01/2023.

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

JUNIOR, I. P. **Caracterização geotécnica e análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Mina de Capão Xavier**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, Minas Gerais, 2005.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

ORIGE, L. P. **Análise de estabilidade e proposta de solução de um talude no bairro Pantanal/Florianópolis – SC**. Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal do Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2016.

PIMENTA, I. J. **Caracterização e Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração em Solos da Minha de Capão Xavier**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2005.

SILVA, J. P. M. D. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2011.

APÊNDICE

São apresentados neste apêndice as tabelas com o percentual de variação dos parâmetros para cada um dos métodos estudados.

- **Coesão**

Tabela 19: Variação por intervalo (%) – coesão/Fellenius

Coesão (kPa)	Fellenius	Intervalo	%
0	0,702	-	-
5	1,355	5->0	48,19%
10	1,791	10->5	24,34%
20	2,576	20->10	30,47%
25	2,949	25->20	12,65%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 20: Variação por intervalo (%) – coesão/Bishop Simplificado

Coesão (kPa)	Bishop Simplificado	Intervalo	%
0	0,704	-	-
5	1,42	5->0	50,42%
10	1,868	10->5	23,98%
20	2,641	20->10	29,27%
25	3,009	25->20	12,23%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 21: Variação por intervalo (%) – coesão/Morgenstern-Price

Coesão (kPa)	Morgenstern-Price	Intervalo	%
0	0,704	-	-
5	1,416	5->0	50,28%
10	1,861	10->5	23,91%
20	2,636	20->10	29,40%
25	3,005	25->20	12,28%

Fonte: Autor (2022)

- **Ângulo de atrito**

Tabela 22: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Fellenius

Ângulo de atrito (°)	Fellenius	Intervalo	%
18	1,249	-	-
28	1,554	28->18	19,63%
35	1,791	35->28	13,23%
40	1,979	40->35	9,50%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 23: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Bishop Simplificado

Ângulo de atrito (°)	Bishop Simplificado	Intervalo	%
18	1,278	-	-
28	1,61	28->18	20,62%
35	1,868	35->28	13,81%
40	2,067	40->35	9,63%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 24: Variação por intervalo (%) – ângulo de atrito/Morgenstern-Price

Ângulo de atrito (°)	Morgenstern-Price	Intervalo	%
18	1,276	-	-
28	1,606	28->18	20,55%
35	1,861	35->28	13,70%
40	2,058	40->35	9,57%

Fonte: Autor (2022)

- **Peso específico**

Tabela 25: Variação por intervalo (%) – peso específico/Fellenius

Peso Específico (kN/m ³)	Fellenius	Intervalo	%
13	2,099	-	-
15	1,954	13->15	6,91%
17	1,841	15->17	5,78%
18	1,791	17->18	2,72%
19	1,747	18->19	2,46%
21	1,671	19->21	4,35%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 26: Variação por intervalo (%) – peso específico/Bishop Simplificado

Peso Específico (kN/m ³)	Bishop Simplificado	Intervalo	%
13	2,172	-	-
15	2,03	13->15	6,54%
17	1,918	15->17	5,52%
18	1,868	17->18	2,61%
19	1,822	18->19	2,46%
21	1,744	109->21	4,28%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 27: Variação por intervalo (%) – peso específico/Morgenstern-Price

Peso Específico (kN/m³)	Morgenstern-Price	Intervalo	%
13	2,166	-	-
15	2,024	13->15	6,56%
17	1,911	15->17	5,58%
18	1,861	17->18	2,62%
19	1,815	18->19	2,47%
21	1,737	19->21	4,30%