



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**Estudo de caso de uma ruptura de talude de solo: Análise
bidimensional e tridimensional**

Maria Eduarda Vilela Diniz

**Ouro Preto
2025**

Maria Eduarda Vilela Diniz

**Estudo de caso de uma ruptura de talude de solo: Análise
bidimensional e tridimensional**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Ouro Preto como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof.^a Dra. Tatiana Barreto dos
Santos

Ouro Preto

2025



FOLHA DE APROVAÇÃO

Maria Eduarda Vilela Diniz

Estudo de caso de uma ruptura de talude de solo: Análise bidimensional e tridimensional

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 05 de setembro de 2025

Membros da banca

Dr^a Tatiana Barreto dos Santos - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Allan Erlikhman Medeiros dos Santos - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 17/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/09/2025, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0979522** e o código CRC **0D1EB122**.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Marta e Flávio, pelo incentivo constante, apoio e por serem minha maior inspiração. Cada conquista que alcanço carrega os sacrifícios que vocês fizeram por mim, e é graças a vocês que posso concluir esta etapa.

À minha irmã, Ana, agradeço pela amizade e pelo apoio em todos os momentos. Você me inspira todos os dias!

Ao Leonardo, minha gratidão pelo apoio imensurável ao longo desta caminhada. Você me faz querer ser sempre melhor.

Ao meu lar, República Mistura Perfeita e a todas que fazem parte dela, deixo meu agradecimento especial. Vocês foram meu porto seguro, minha família escolhida, e tornaram essa jornada mais alegre e leve.

Agradeço ao DEMIN/UFOP, à Escola de Minas, à LAGEM, ao SEMINAS e à Fundação Gorceix pelo ensino, oportunidades e suporte acadêmico.

Por fim, minha profunda gratidão à Prof.^a Tatiana, por ser uma profissional admirável e uma mulher inspiradora. Obrigada!

Resumo

A instabilidade de taludes é uma preocupação constante em áreas urbanas e na mineração, sendo recorrente durante o período chuvoso. Embora as chuvas intensas sejam um fator agravante, outros elementos contribuem para o risco de ruptura, como geologia, presença de descontinuidades, processos erosivos, inclinação acentuada e outros. Esses eventos não apenas colocam vidas em risco, como também podem gerar prejuízos financeiros significativos. Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias eficazes para a análise da estabilidade dos taludes. A norma brasileira NBR 11682:2009 estabelece que o fator de segurança mínimo recomendado para taludes em áreas urbanas é de 1,5. Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa da estabilidade de um talude natural localizado em área urbana no estado de Minas Gerais, utilizando modelos bidimensionais e tridimensionais. Para isso, foram utilizados os softwares Slide2 e Slide3, da Rocscience, em diferentes cenários de poropressão. A metodologia adotada combina o método de equilíbrio limite por GLE/Morgenstern-Price. Para obtenção dos dados geológico e geotécnicos, foram realizadas seis sondagens SPT no talude. A partir desses ensaios, foi possível estimar os parâmetros de resistência do solo com base na correlação com os valores de N_{spt} , sendo posteriormente utilizados nos softwares para a caracterização dos estratos. Por fim, ao comparar os resultados obtidos nas análises, percebe-se que os fatores de segurança (FS) encontrados são semelhantes, contrariando a ideia de que modelos bidimensionais são excessivamente conservadores. Na condição de poropressão igual a zero, o FS na análise tridimensional foi de 1 a 3% superior ao das seções bidimensionais. Para poropressão de 0,5, os FS foram equivalentes em uma das seções analisadas, e para o último cenário, em que a poropressão foi de 0,9, o FS na análise 3D mostrou-se significativamente maior que na 2D.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes, análise de estabilidade bi e tridimensional, método equilíbrio limite, método de fatias, sondagem SPT.

Abstract

Slope instability is a constant concern in urban areas and mining operations, especially during the rainy season. Although intense rainfall is an aggravating factor, other elements also contribute to the risk of failure, such as soil or rock geology, the presence of discontinuities, erosive processes, steep slopes, among others. These events not only pose risks to human life but can also lead to significant financial losses. Given this scenario, the development of effective methodologies for slope stability analysis becomes essential. The Brazilian standard NBR 11682:2009 establishes a minimum recommended safety factor of 1.5 for slopes in urban areas. This study aims to conduct a comparative analysis of the stability of a natural slope located in an urban area in the state of Minas Gerais, using both two-dimensional and three-dimensional models. For this purpose, the Slide2 and Slide3 software from Rocscience were applied under different pore pressure scenarios. The adopted methodology combines the limit equilibrium method with the slice method using the GLE/Morgenstern-Price formulation. To obtain geological and geotechnical data, six SPT boreholes were conducted on the slope. Based on these tests, it was possible to estimate the soil strength parameters through correlations with N_{spt} values, which were later used in software for stratigraphic characterization. Finally, when comparing the results obtained from the analyses, it is observed that the safety factors found are similar, contradicting the notion that two-dimensional models are excessively conservative. Under the condition of zero pore pressure, the SF in the three-dimensional analysis was 1 to 3% higher than in the two-dimensional sections. For a pore pressure of 0.5, the SFs were equivalent in one of the analyzed sections, and in the final scenario, with a pore pressure of 0.9, the SF in the 3D analysis was significantly higher than in the 2D.

Keywords: Slope stability, two- and three-dimensional stability analysis, limit equilibrium method, slice method, SPT borehole.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores estimados de coesão.....	20
Tabela 2 - Valores estimados do ângulo de atrito.....	20
Tabela 3 - Peso específico de solos argilosos.....	21
Tabela 4 - Peso específico de solos arenosos.....	21
Tabela 5 - Parâmetros médios do solo.....	22
Tabela 6 – Métodos de fatias e condições de equilíbrio.....	26
Tabela 7 – Resumo análise tridimensional.....	30
Tabela 8 – Profundidade dos furos.....	36
Tabela 9 - Estratos e parâmetros de resistência.....	39
Tabela 10 - Resumo dos FS para $ru = 0$ - Slide2.....	48
Tabela 11 - Resumo dos FS para $ru = 0,5$ - Slide2.....	49
Tabela 12 - Resumo dos FS para $ru = 0,9$ - Slide2.....	49
Tabela 13 – Resumo FS Slide2.....	53
Tabela 14 - Resumo FS Slide3.....	53

Lista de Figuras

Figura 1 - Terminologia aplicada para taludes.....	15
Figura 2 - Campo de forças em um talude	15
Figura 3 - Vista dos elementos constituintes do ensaio SPT	18
Figura 4 - Análise das Forças Atuantes em Cada Fatia	25
Figura 5 - Vista tridimensional das forças atuantes sob uma coluna	27
Figura 6 - Localização furos de sondagem.....	31
Figura 7 - Croqui de localização dos furos de sondagem.....	32
Figura 8 - Planta topográfica do talude e vias no Deswik.CAD.....	35
Figura 9 - Vista frontal da superfície do talude no Deswik.CAD	35
Figura 10 - Vista superior da superfície do talude no Deswik.CAD.....	36
Figura 11 - Superfície topográfica e furos de sondagem - Slide3	37
Figura 12 - Superfície topográfica e furos de sondagem vista superior - Slide3	37
Figura 13 - Superfície topográfica e furos de sondagem vista frontal - Slide3	38
Figura 14 – Estratos SP-01	40
Figura 15 - Estratos SP-02.....	40
Figura 16 - Estratos SP-03.....	41
Figura 17 - Estratos SP-04.....	41
Figura 18 - Estratos SP-05.....	42
Figura 19 - Estratos SP-06.....	42
Figura 20 - Localização das seções no talude.....	43
Figura 21 - Seção transversal do talude A-A.....	44
Figura 22 - Seção transversal do talude B-B.....	44
Figura 23 - Seção transversal do talude C-C	45
Figura 24 - Seção transversal do talude D-D	45
Figura 25 - Seção A-A: fator de segurança para $ru = 0$	46
Figura 26 - Seção B-B: fator de segurança para $ru = 0$	46
Figura 27 - Seção C-C: fator de segurança para $ru = 0$	47
Figura 28 - Seção D-D: fator de segurança para $ru = 0$	47
Figura 29 - Fator de segurança para $ru = 0$ - Slide3	50
Figura 30 - Contornos de ruptura e FS para $ru = 0$ - Slide3	51
Figura 31 - Fator de segurança para $ru = 0,5$ - Slide3.....	52
Figura 32 - Fator de segurança para $ru = 0,9$ - Slide3.....	52

Sumário

1. Introdução.....	11
2. Objetivos.....	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivo Específico.....	13
3. Justificativa e Relevância.....	13
4. Revisão Bibliográfica	14
4.1 Estabilidade de Taludes	14
4.1.1 Taludes.....	14
4.1.2 Estabilidade	16
4.2 Ensaio de Campo	16
4.2.1 SPT - Standard Penetration Test	16
4.3 Parâmetros de resistência do solo.....	19
4.3.1 Coesão	19
4.3.2 Ângulo de atrito.....	20
4.3.3 Peso específico	21
4.4 Método do Equilíbrio Limite	23
4.5 Métodos de Fatias 2D	24
4.6 Métodos de Fatias 3D	27
4.7 Relação entre 2D e 3D	28
5. Materiais e Métodos	31
5.1 O Talude	31
5.2 Metodologia.....	32
6. Resultados e Discussões.....	34
6.1 Superfície Topográfica e Geometria	34
6.2 Determinação dos Parâmetros de Resistência do Solo	38
6.3 Análise de Estabilidade 2D.....	43
6.3.1 Condições de poropressão nula.....	45
6.3.2 Condições de poropressão 0,5 e 0,9.....	48
6.4 Análise de Estabilidade 3D.....	50
6.4.1 Condições de poropressão nula.....	50
6.4.2 Condições de poropressão 0,5 e 0,9.....	51
6.5 Análise comparativa	52

7. Conclusão.....	54
Referências Bibliográficas	56

1. Introdução

Os desastres naturais como os deslizamentos de massa são recorrentes no Brasil. Durante o período chuvoso, as ocorrências tendem a se intensificar devido à diversidade geomorfológica e à ocupação urbana desordenada. Os movimentos gravitacionais de massa de taludes e encostas estão relacionados à maior parte dos desastres provocados por eventos naturais no país, conforme apontam os dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) e Serviço Geológico do Brasil (SGB).

Os impactos causados pelos desastres naturais são diversos e significativos, afetando as populações que vivem próximas às áreas atingidas, provocando danos à fauna e à flora locais, comprometendo centros urbanos, vias de acesso e gerando elevados custos com obras de recuperação e construção de estruturas geotécnicas para contenção. Em 2024, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden, 2025) emitiu 1.918 alertas para desastres, dos quais 540 foram registrados. De acordo com o Atlas Digital de Desastres (Sedec/MIDR, 2025), entre os anos de 1991 e 2024, esses eventos resultaram em 637 óbitos e afetaram aproximadamente 238 mil pessoas, que foram desalojadas ou desabrigadas. As perdas econômicas acumuladas nesse período totalizaram R\$15,86 bilhões em danos materiais e R\$1,26 bilhão em prejuízos à infraestrutura pública, evidenciando a magnitude dos impactos associados aos desastres por deslizamento de massa.

Os taludes, naturais ou artificiais, estão entre os principais elementos geotécnicos envolvidos em deslizamentos de terra, sendo suscetíveis à instabilidade de forma natural, ocasionadas por descontinuidades do maciço rochoso ou solo, erosões, presença de água, inclinação da face, entre outros fatores. Segundo a legislação brasileira, os taludes artificiais em áreas urbanas ou de infraestrutura devem seguir princípios e métodos empíricos consolidados, devendo ser adequadamente dimensionados, monitorados continuamente e, quando necessário, submetidos a intervenções para estabilização. De acordo com a NBR 11682:2009, o fator de segurança sugerido para taludes urbanos deve ser de, no mínimo, 1,5.

Dada a complexidade dos problemas associados aos escorregamentos de taludes, metodologias foram desenvolvidas para a análise da estabilidade de taludes, consequentemente de sua segurança. Para Santos (2016), a segurança dos taludes está diretamente relacionada com a sua condição de estabilidade, que por sua vez está relacionada com o tipo de material e suas características, geometria do talude e geologia estrutural que contempla o maciço e as áreas do entorno. Gerscovich (2012), propõe que as análises sejam realizadas com base na geometria do problema, na inclusão de carregamentos externos, no conhecimento das propriedades geomecânicas dos solos e nos padrões de fluxo.

Sob essa perspectiva, o presente estudo realiza análises de estabilidade bi e tridimensional de um talude natural, situado em área urbana em Minas Gerais, utilizando os softwares Slide2 e Slide3, da Rocscience. Para isso, foi aplicado o método de equilíbrio limite GLE/Morgenstern-Price considerando diferentes poropressões.

Neste trabalho será apresentada uma revisão bibliográfica que abrange o ensaio de sondagem à percussão (*Standard Penetration Test*), os parâmetros de resistência dos solos, segundo diferentes autores, além do método de equilíbrio limite e de fatias para as análises de estabilidade. Este referencial teórico fornecerá suporte à elaboração dos modelos bi e tridimensionais, visando à realização das análises de estabilidade do talude proposto.

2. Objetivos

Abaixo estão descritos os objetivos gerais e específicos, respectivamente, do estudo de caso proposto.

2.1 Objetivo Geral

- Análise de estabilidade bidimensional e tridimensional de um talude urbano utilizando o método de equilíbrio limite. Para isso, serão utilizados os softwares Slide2 (2021) e Slide3 (2021), que permitirão simular diferentes cenários de poropressão, a fim de comparar os fatores de segurança (FS) obtidos. A

definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo será feita segundo a interpretação do relatório de sondagem SPT.

2.2 Objetivo Específico

- Preparar e depurar o levantamento topográfico para o uso no software;
- Definir os parâmetros de resistência do solo a partir dos ensaios SPT;
- Construir modelos bi e tridimensionais do talude;
- Analisar e comparar os fatores de segurança para diferentes cenários de poropressão;
- Verificar a aplicabilidade de tais softwares e suas principais características;
- Avaliar os resultados de cada análise e determinar qual apresenta maior grau de conservadorismo nos FS de estabilidade.

3. Justificativa e Relevância

A estabilidade de taludes representa uma temática de grande relevância na engenharia, sobretudo em regiões sujeitas a intensas variações climáticas como no Brasil. Anualmente, são registrados inúmeros desastres envolvendo deslizamentos de massa, resultando em perdas humanas e materiais. Esses eventos não se restringem ao ambiente urbano, estendendo-se também à mineração, como no rompimento do talude global da pilha de estéril ocorrido em 2024, no município de Conceição do Pará, Minas Gerais, em que mais de 100 pessoas foram evacuadas e aproximadamente 60 casas interditadas (MPMG, 2024).

A análise bidimensional tem sido amplamente empregada devido à sua simplicidade e à menor dependência de dados de alimentação dos modelos. Como alternativa complementar, as análises tridimensionais vêm ganhando espaço por permitirem uma compreensão mais precisa da geometria do terreno, das superfícies e direção das rupturas. Ainda assim, para taludes urbanos e de pequeno porte, a modelagem bidimensional segue como a principal escolha.

Neste contexto, o presente estudo propõe avaliar o desempenho das abordagens 2D e 3D, quando aplicadas a diferentes cenários de poropressão, a partir de dados restritos obtidos por meio do ensaio SPT. Além disso, busca-se comparar os resultados obtidos, destacando as potencialidades e limitações de cada modelo na interpretação geotécnica.

Assim, o presente estudo se justifica pela importância do comparativo entre os modelos e sua performance em três cenários de poropressão diferentes. Além de apresentar diferentes referências bibliográficas que possam auxiliar na escolha dos parâmetros de resistência do solo, especialmente em áreas pouco investigadas.

Para a comunidade acadêmica, este estudo representa uma contribuição significativa ao consolidar um modelo de análise que pode ser replicado e adaptado em outras situações de instabilidade de taludes. A abordagem comparativa adotada serve como referência metodológica para futuras pesquisas, promovendo o desenvolvimento de novos estudos voltados à avaliação da estabilidade de encostas por diferentes ferramentas computacionais. Além disso, contribui para a tomada de decisão em projetos de reforço geotécnicos, de modo garantir a estabilidade e a segurança de encostas urbanas.

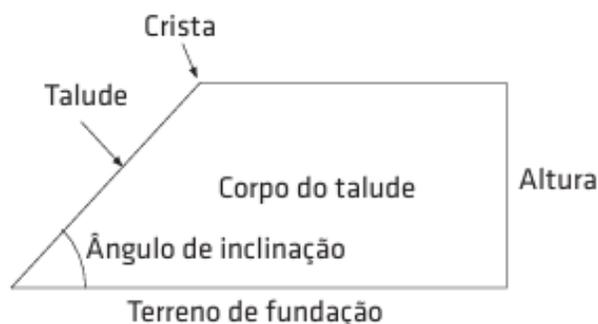
4. Revisão Bibliográfica

4.1 Estabilidade de Taludes

4.1.1 Taludes

Os autores Fiori (2015) e Gerscovich (2012) apresentam definições semelhantes para a caracterização de talude. Ambos definem o talude como qualquer superfície inclinada de um maciço de rocha, solo ou de ambos. Pode ser natural, como encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros.

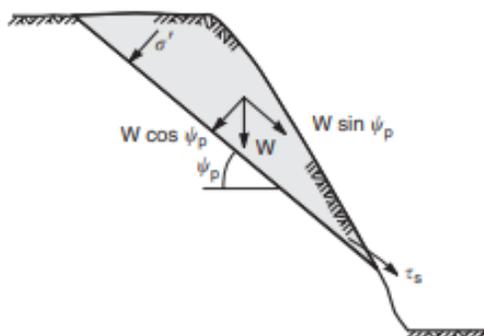
Figura 1 - Terminologia aplicada para taludes



Fonte: Adaptado de Fiori (2015)

Ainda segundo Fiori (2015), do ponto de vista teórico, um talude está sujeito a três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. Sendo estas forças em equilíbrio para que a estrutura não se rompa. O modo como o rompimento se manifesta está diretamente relacionado à configuração geomorfológica do maciço rochoso.

Figura 2 - Campo de forças em um talude



Fonte: Wyllie & Mah (2004)

Sendo:

$w \cos \psi_p$ - componente do peso perpendicular ao plano (kN);

$w \sin \psi_p$ - componente do peso paralelo ao plano (kN);

ψ - inclinação do plano ($^\circ$);

τ - tensão de cisalhamento (kPa).

4.1.2 Estabilidade

Segundo Gerscovich (2012), a análise de estabilidade tem como objetivo avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo. Para Pedrosa, *et al.* (2023), a análise envolve a aplicação de metodologias específicas para determinar a carga máxima que pode ser suportada por uma estrutura geotécnica. Para isso, dois elementos precisam ser avaliados: a identificação da superfície de ruptura crítica e o cálculo do fator de segurança associado a essa superfície.

No presente trabalho, embora um setor do talude já tenha sofrido ruptura, a abordagem concentra-se na análise do restante do talude, visando avaliar sua estabilidade e identificar possíveis rupturas para diferentes valores de poropressão. Para Wyllie & Mah (2004), a estabilidade de taludes é reduzida conforme o efeito da pressão da água reduz as tensões efetivas. No entanto, o impacto de diferentes pressupostos relacionados à distribuição da poropressão é incerto.

Segundo Borchardt (2012), a retroanálise consiste em toda análise feita após a ruptura, com o objetivo de estimar os parâmetros de resistência mobilizados no momento anterior ao escorregamento. A NBR 11682 - Estabilidade de Encostas - (ABNT, 2009) sugere que a retroanálise seja realizada com base nas investigações procedidas, na geometria do talude e no mecanismo de ruptura associado, além de ser desempenhada com modelos matemáticos baseados no equilíbrio limite, admitindo-se $FS = 1,00$.

4.2 Ensaio de Campo

4.2.1 SPT - Standard Penetration Test

A sondagem à percussão é um ensaio *in situ* de penetração dinâmica com o objetivo de determinar os tipos de solo em suas respectivas profundidades de ocorrência, posição do nível-d'água e estimar os índices de resistência à penetração (N) a cada metro, conforme a NBR 6484 - Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio - ABNT (2020).

O ensaio inicia com a escavação do primeiro metro de profundidade, feita por um trado-concha ou cavadeira manual. Após isso, a perfuração prossegue mecanicamente. A cada metro, retira-se uma amostra do solo utilizando um amostrador-padrão. Este amostrador, já acoplado ao sistema de cravação, é posicionado no furo, e uma marcação de 45 cm é feita na haste, dividindo em três partes de 15 cm.

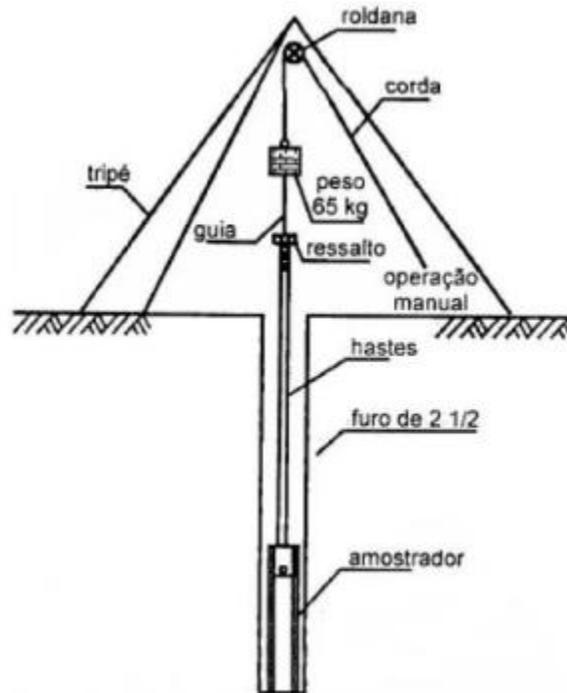
O solo é perfurado utilizando este amostrador que é cravado por meio da queda de um peso padronizado de 65 kg, a uma altura de 75 cm. A cada metro de profundidade, registra-se o número de golpes necessários para cravar o amostrador no solo. O valor obtido é chamado de N_{SPT} ou N_{30} e corresponde à soma dos golpes necessários para os dois últimos segmentos de 15 cm.

As amostras representativas do solo são retiradas a cada metro de profundidade utilizando o amostrador-padrão, que é composto por três partes principais: amostrador, hastes, martelo, torre ou tripé de sondagem, cabeça de bater e conjunto de perfuração (Schnaid, 2025).

O corpo, normalmente fabricado em aço, deve possuir superfícies internas e externas lisas. Suas dimensões seguem padrões específicos: diâmetro externo de 51 mm (com tolerância de ± 1 mm), diâmetro interno de 35 mm (também com tolerância de ± 1 mm), e comprimento mínimo de 457 mm (NBR 6484, 2020).

A Figura 3 a seguir apresenta o modelo.

Figura 3 - Vista dos elementos constituintes do ensaio SPT



Fonte: Schnaid (2000)

De acordo com a NBR 6484 (2020), a cravação deve ser interrompida antes de atingir os 45 cm totais em três situações:

- a) se, em qualquer um dos segmentos de 15 cm, forem necessários mais de 30 golpes;
- b) se o total de 50 golpes for alcançado durante toda a cravação;
- c) se não houver nenhum avanço do amostrador após a aplicação de cinco golpes consecutivos.

Ainda segundo a NBR 6484 (2020), durante a sondagem, o operador precisa estar atento a indícios visuais e táteis de umidade, que podem indicar a proximidade do nível d'água. Se for observado que o solo está visivelmente molhado em determinada profundidade, a perfuração é interrompida temporariamente. Nessa etapa, o nível d'água deve ser monitorado, observado e medido a cada 5 minutos, durante pelo menos 15 minutos, a fim de verificar sua estabilização dentro do furo.

Para Schnaid (2025), as vantagens desse ensaio com relação aos demais são: a simplicidade do equipamento, o baixo custo e a obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado por meio de propostas não sofisticadas, mas diretas, com regras empíricas de projeto.

4.3 Parâmetros de resistência do solo

O índice de resistência a penetração (N_{SPT}), resultante do ensaio, pode ser relacionado com diversos parâmetros do solo, mediante correlações de natureza empírica. Para a resistência ao cisalhamento, Wyllie & Mah (2004), assumem que todo o material rochoso se comporta como um material de Mohr-Coulomb e que a resistência é expressa em termos de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ).

A seguir, são apresentadas correlações estabelecidas entre o N_{SPT} e coesão, ângulo de atrito interno (ϕ) e peso específico (γ).

4.3.1 Coesão

Teixeira e Godoy (1996 apud Hachich *et al.*, 1998), propuseram a relação da coesão do solo com N_{SPT} como:

$$c = 10 \cdot N_{SPT} \quad 4.1$$

Onde c é dado em kPa.

Por outro lado, Alonso (1983), apresenta uma tabela, que na ausência de ensaios de laboratório, fornecem parâmetros necessários. Essa abordagem é útil em etapas preliminares de análise, permitindo embasar decisões técnicas mesmo diante da limitação de dados experimentais. A Tabela 1 - Valores estimados de coesão apresenta os valores estimados.

Tabela 1 - Valores estimados de coesão

Argilas	Standart Penetration Testt (SPT)	Coesão c (kPa)
Muito mole	< 2	< 10
Mole	2 a 4	10 a 25
Média	4 a 8	25 a 50
Rija	8 a 15	50 a 100
Muito rija	15 a 30	100 a 200
Dura	> 30	> 200

Fonte: Alonso (1983)

4.3.2 Ângulo de atrito

Alonso (1983), ainda apresenta valores do ângulo de atrito para uma primeira aproximação. A Tabela 2 apresenta os valores correlacionados com o N_{SPT} .

Tabela 2 - Valores estimados do ângulo de atrito

Areias	Standart Penetration Testt (SPT)	ângulo de atrito ϕ (°)
Fofa	< 4	< 30
Pouco compacta	4 a 10	30 a 35
Medianamente compacta	10 a 30	35 a 40
Compacta	30 a 50	40 a 45
Muito compacta	> 50	> 45

Fonte: Alonso (1983)

Por outro caminho, Godoy e Teixeira, por meio de cálculos, estabeleceram 2 equações para o cálculo do ângulo de atrito do solo na condição não drenada.

Godoy (1983):

$$\varphi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT}$$

4.2

Teixeira (1996, apud Hachich *et al.* 1998):

$$\varphi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 15^\circ$$

4.3

4.3.3 Peso específico

Godoy (1972), em outro trabalho, propõe correlação entre o peso específico natural e N_{SPT} , apresentando valores diferentes para solos argilosos e arenosos. E ainda pontua que tais correlações possuem caráter empírico e uso limitado a estudos preliminares. As Tabela 3 e Tabela 4 apresentam os pesos específicos.

Tabela 3 - Peso específico de solos argilosos

Solos Argilosos		
Nspt	Consistência	Peso Específico (kN/m³)
≤ 2	Muito mole	13
3 a 5	Mole	15
6 a 10	Média	17
11 a 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972, apud Hachich *et al.*, 1998)

Tabela 4 - Peso específico de solos arenosos

Solos Arenosos				
Nspt	Consistência	Peso Específico (kN/m³)		
		Seca	Úmida	Saturada
≤ 5	Fofa	16	18	19
5 a 8	Pouco Compacta	16	18	19
9 a 18	Mediamente Compacta	17	19	20
19 a 40	Compacta	18	20	21
≥ 40	Muito Compacta	18	20	21

Fonte: Godoy (1972, (1996 apud Hachich *et al.*, 1998)

Joppert (2007), relaciona o N_{SPT} com os parâmetros mencionados acima e ainda complementa com o módulo de elasticidade. Diferenciando nas unidades de medidas usadas. A Tabela 5 apresenta a relação proposta por Joppert.

Tabela 5 - Parâmetros médios do solo

Tipo de Solo	Faixa SPT	Módulo de elasticidade (t/m ²)	Peso específico (g)		Angulo de atrito efetivo (g)	Coesão efetiva (tf/m ²)
			Natural (t/m ³)	Saturado (t/m ³)		
Areia pouco siltosa/ pouco argilosa	0-4	2000 - 5000	1,7	1,8	25	-
	5 - 8	4000 - 8000	1,8	1,9	30	-
	8 -18	5000 - 10000	1,9	2	32	-
	19 - 41	8000 - 15000	2	2,1	35	-
	≥ 41	16000 - 20000	2	2,1	38	-
Areia média e fina muito argilosa	0-4	2000	1,7	1,8	25	0
	5 - 8	4000	1,8	1,9	28	0,5
	8 -18	5000	1,9	2	30	0,75
	19 - 41	10000	2	2,1	32	1
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	200 - 500	1,5	1,7	20	0,75
	3 - 5	5000 - 1000	1,6	1,7	23	1,5
	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25	3
	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	202	0,75
	3 - 5	100 - 250	1,8	1,9	23	1,5
	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24	2
	11 - 19	500 -1000	1,9	1,9	24	3
	20 - 30	3000 - 10000	2	2	25	4
	≥ 30	10000 - 15000	2	2	25	5
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15	1
	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15	2
	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18	3,5
	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20	5
	≥ 20	3500 - 5000	2	2	25	6,5
Turfa/ argila orgânica	0 - 1	40 - 100	1,1	1,1	15	0,5
	2 - 5	100 - 150	1,2	1,2	15	1
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	800	1,8	1,9	25	1,5
	9 - 18	1000	1,9	2	26	2
	19 - 41	15000	2	2	27	3
	≥ 41	20000	2,1	2,1	28	5

Fonte: Joppert (2007)

4.4 Método do Equilíbrio Limite

De acordo com Gerscovich (2012), o método do equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, em que pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície que atinge simultaneamente a mesma condição de $FS=1$. Da mesma forma, Massad (2010) coloca que FS é constante ao longo da linha de ruptura, em outras palavras, desconsidera eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Para Guidicini e Nieble (1984), a análise considera que as forças tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas por esforços resistentes. Esta premissa se conecta com a abordagem de Read e Stacey (2009), em que, os esforços determinam as condições de estabilidade de um talude por meio do fator de segurança, sendo este calculado a partir da geometria representativa do talude, a resistência ao cisalhamento do maciço e/ou das discontinuidades, seu peso específico, as condições de percolação de água e outras condições externas.

O fator de segurança (FS) pode ser definido como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento (Oliveira, 2023), conforme equação a seguir.

$$FS = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças solicitantes}} \quad 4.4$$

Sob uma perspectiva matemática, quando as forças solicitantes excedem as forças resistentes, o fator de segurança torna-se inferior a 1, indicando um estado de instabilidade com risco iminente de ruptura. Por outro lado, quando essas forças se igualam, o FS é igual a 1, e caracteriza uma condição de equilíbrio crítico, sugerindo uma possível ruptura. Quando as forças resistentes prevalecem, FS é superior a 1 e indica estabilidade estrutural.

No contexto brasileiro, as recomendações técnicas para os FS , variam conforme o tipo de estrutura analisada e o nível de segurança requerido, sugerindo valores de 1,2

a 1,5. Esses parâmetros consideram os riscos associados à perda de vidas humanas, aos danos materiais e aos impactos ambientais, sendo imprescindível a consulta às normas e diretrizes específicas aplicáveis para cada caso.

4.5 Métodos de Fatias 2D

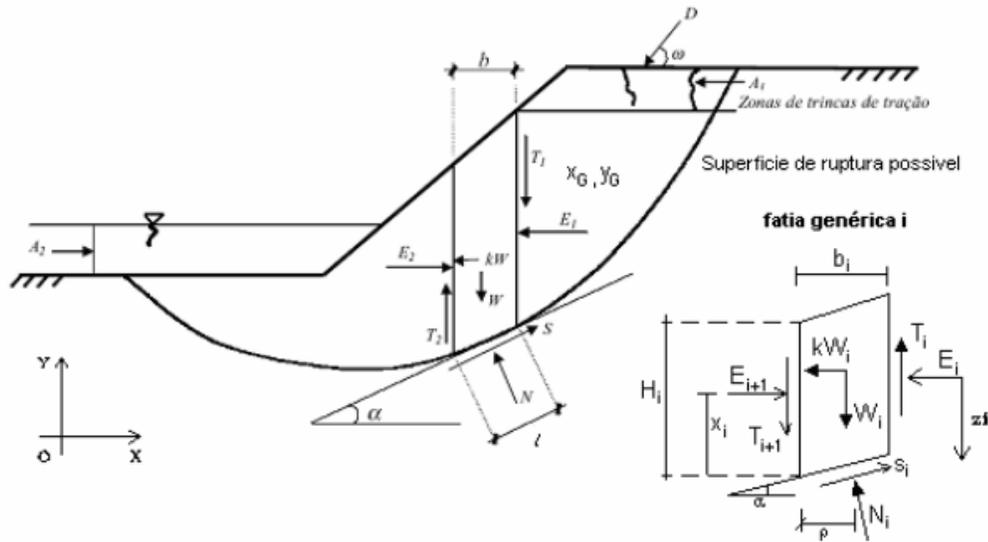
Desenvolvido pelo engenheiro sueco Fellenius (1936), o método baseia-se na análise estática do volume do material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de secção circular, e dividido em fatias verticais (Fiori, 2025).

Para Duncan *et al.* (2014), a massa de solo acima da superfície de ruptura assumida é dividida em fatias verticais, sendo que a quantidade de fatias depende da geometria do talude e da estratigrafia do maciço. As superfícies de ruptura avaliadas podem ser de 2 formas: circulares e não circulares. Os métodos que consideram rupturas circulares adotam o equilíbrio de momento em relação ao centro do círculo de todo o corpo-livre, composto por todas as fatias. Já os métodos que avaliam rupturas não circulares usualmente consideram o equilíbrio em termos de cada fatia.

A metodologia segue as seguintes etapas: o talude é subdividido em fatias, assumindo-se a base da fatia como linear. Nessa subdivisão, deve-se garantir que a base da fatia esteja contida no mesmo material, isto é, não podem existir dois materiais na base da lamela. Adicionalmente, o topo da fatia não deve apresentar descontinuidades (Gerscovich, 2012).

Na Figura 4, são representadas as forças atuantes em uma fatia vertical no talude, permitindo a análise detalhada dos esforços que influenciam a estabilidade da superfície de ruptura.

Figura 4 - Análise das Forças Atuantes em Cada Fatia



Fonte: Morote, 2006

Onde:

W - peso da fatia;

kW - componente horizontal da força de inércia;

N - Força normal à base da fatia;

S - Força tangencial à base da fatia ($S = \tau l$);

E1, E2 - Componente horizontal das forças entre as fatias;

T1, T2 - Componente vertical das forças entre as fatias;

D - Força aplicada na superfície;

b - Largura da fatia;

l - Comprimento da base da fatia; e

A1, A2 = Forças hidrostáticas.

Segundo Wyllie & Mah (2004), ao longo do último meio século, produziu-se uma extensa literatura sobre a ruptura circular. Como os de Taylor (1937), Terzaghi (1943), Bishop (1955), Janbu (1954), Morgenstern e Price (1965), Nonveiller (1965), Peck (1967), Spencer (1967, 1969) e Duncan (1996).

As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os métodos, suposições e condições de equilíbrio satisfeitas.

Tabela 5 – Métodos de equilíbrio limite e suposições

Método	Suposições
Fellenius	A superfície de ruptura é circular; as forças entre as fatias não são consideradas.
Simplificado de Bishop	A superfície de ruptura é circular; as forças nas fatias são horizontais (ou seja, não há força de cisalhamento entre fatias).
Janbu Simplificado	As inclinações das forças entre as fatias são incluídas; as suposições variam conforme o procedimento.
Spencer	As forças entre fatias são paralelas, ou seja, todas têm a mesma inclinação. A posição da força normal (N) na base da fatia é assumida, geralmente no centro da base.
Morgenstern & Price	A força de cisalhamento entre as fatias está relacionada à força normal. A posição da força normal (N) na base da fatia é assumida, geralmente no centro da base.

Fonte: Adaptado de Duncan et. al (2014)

Tabela 6 – Métodos de fatias e condições de equilíbrio

Método	Equilíbrio de Forças		Momento
	Eixo X	Eixo Y	
Bishop (1955)	Sim	Não	Sim
GLE	Sim	Sim	Sim
Spencer (1973)	Sim	Sim	Sim
Janbu (1973)	Sim	Não	Não

Fonte – Adaptado de Drumond (2022, apud Abramson *et al.* 2002)

4.6 Métodos de Fatias 3D

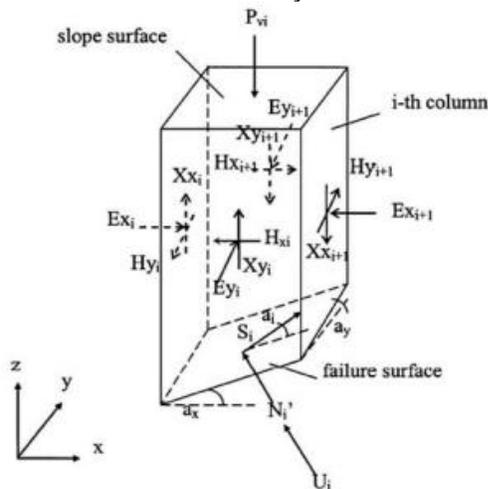
A evolução do método de fatias bidimensionais para o contexto tridimensional consiste na substituição das tradicionais fatias verticais por colunas espaciais ao longo do talude. As forças e os momentos atuantes em cada fatia são decompostos em componentes ortogonais, o que proporciona uma análise ao longo do comprimento do talude.

Diferentemente do modelo 2D, que assume homogeneidade e geometria constante ao longo do eixo perpendicular à seção analisada, o método tridimensional considera as variações topográficas e geológicas do solo, bem como as mudanças no perfil geológico ao longo da extensão do talude. Para Fredlund et. al (2015), a aplicação da análise em 3D por meio do equilíbrio limite na prática da engenharia geotécnica requer a consideração dos efeitos de:

- I. forma da superfície de ruptura, que pode ser elíptica, baseada em blocos ou composta;
- II. geometria da superfície do terreno; e
- III. variação das camadas geológicas (estratigrafia).

No método 3D, as forças existentes em uma coluna são apresentadas na Figura 5 (Rocscience, 2019).

Figura 5 - Vista tridimensional das forças atuantes sob uma coluna



Fonte - Rocscience (2019)

Sendo:

N, U - Força normal efetiva e poropressão na base da coluna;

S - Força de cisalhamento mobilizada na base da coluna;

a - Direção do deslizamento;

E - Forças normais entre as colunas;

X - Forças de cisalhamento verticais entre colunas;

H - Forças de cisalhamento horizontais entre colunas; e

P - Força externa vertical.

4.7 Relação entre 2D e 3D

Segundo Fredlund (2015, apud Reyes, 2014) o uso de softwares para análises em 3D tem sido tradicionalmente bastante limitado. No entanto, conforme Ducan (1966), diversos estudos vêm sendo conduzidos em modelos tridimensionais desde o final da década de 1960.

De acordo com Zhang *et al* (2015, apud Fredlund *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2005), alguns problemas de engenharia possuem particularidades tridimensionais que não podem ser considerados nos modelos convencionais bidimensionais. Nesses casos, o uso da modelagem tridimensional torna-se essencial para uma representação mais realista de geometrias complexas, das poropressões e das propriedades dos materiais ao longo da extensão do local.

Para Drumond (2022), a análise bidimensional, do ponto de vista executivo, é mais viável, pois apresenta resultados consistentes, exige menor capacidade computacional, demanda menor tempo de processamento e requer menos conhecimento técnico por parte do usuário. Por outro lado, a análise tridimensional requer domínio de ferramentas específicas para a construção de modelos geomecânicos, além de maior tempo para sua

elaboração e execução. Mas que, ainda assim, trata-se de uma abordagem promissora e altamente relevante como evolução das análises bidimensionais convencionais.

Em determinadas circunstâncias, os valores de fator de segurança obtidos por meio da análise bidimensional podem ser superiores aos da tridimensional. Essa diferença decorre das particularidades dos métodos utilizados em cada metodologia. Frequentemente, a análise 3D é aplicada à seção considerada mais crítica na avaliação 2D, no entanto, a superfície crítica identificada na análise 2D nem sempre corresponde àquela que seria obtida por meio de modelagem 3D (Antocheviz, 2018).

Duncan (1996) afirma que estudos no modelo 3D confirmam que o fator de segurança calculado por meio de análises tridimensionais será sempre maior ou igual ao fator de segurança obtido por análises bidimensionais. E por isso, é válido lembrar que a utilização de um fator de segurança mais ou menos conservador influenciará na elaboração de um projeto geotécnico, seja ele da análise bidimensional ou tridimensional (Oliveira, 2006).

A Tabela 7 uma síntese das análises tridimensionais realizadas por diferentes autores.

Tabela 7 – Resumo análise tridimensional

Autores	Métodos	Força	Geometria do talude/ superfície de escorregamento	Efeitos 3D encontrados
Anagnosti (1969)	Morgenstern and Price estendido	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 = 1.5 F_2$ em um caso
Baligh and Azzouz (1975)	Arco circular estendido	$\Phi=0$	Taludes simples/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Giger and Krizek (1975)	Teoria do limite superior de plasticidade perfeita	c, Φ	Taludes irregulares/espiral logarítmica (com carga no topo)	$F_3 > F_2$
Giger and Krizek (1976)	Teoria do limite superior de plasticidade perfeita	c, Φ	Taludes irregulares/espiral logarítmica	$F_3 > F_2$
Baligh et al. (1977)	Arco circular estendido	$\Phi=0$	Taludes sob cargas simples/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Hovland (1977)	Método ordinário das fatias estendido	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 < F_2$ para alguns casos
Azzouz et al (1981)	Círculo sueco estendido	$\Phi=0$	Quatro aterros reais/superfície de revolução	$F_3 = 1,07 F_2$ a $1,3 F_2$
Chen and Chameou (1982)	Spencer estendido e elemento finito	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	Resultados Spencer similares ao elemento finito
Chen and Chameou (1983)	Spencer estendido	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 < F_2$ para alguns casos
Azzouz and Baligh (1983)	Círculo sueco estendido	$\Phi=0$	Mesmo que Baligh and Azzouz com cargas no topo	$F_3 > F_2$
Dennhardt and Forster (1985)	S assumido na superfície de escorregamento	c, Φ	Taludes sob cargas/irrestrita	$F_3 > F_2$
Leshchinsky et al. (1985)	Equilíbrio limite e análise variacional	c, Φ	Irrestrita	$F_3 > F_2$
Ugai (1985)	Equilíbrio limite e análise variacional	$\Phi=0$	Taludes verticais/cilíndricas	$F_3 > F_2$
Leshchinsky and Baker (1986)	Equilíbrio limite e análise variacional	c, Φ	Taludes restritos na 3ª dimensão/irrestrita	$F_3 > F_2$ para $c > 0$, $F_3 = F_2$ para $c = 0$
Baker and Leshchinsky (1987)	Equilíbrio limite e análise variacional	c, Φ	Pilhas cônicas/irrestrita	$F_3 > F_2$
Cavounidis (1987)	Equilíbrio limite	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	F_3 tem que ser $> F_2$
Hungr (1987)	Bishop estendido modificado	c, Φ	Irrestrita/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Gens et al. (1988)	Círculo sueco estendido	$\Phi=0$	Taludes simples/superfícies de revolução	$F_3 > F_2$
Leshchinsky and Mullet (1988)	Equilíbrio limite e análise variacional	c, Φ	Taludes verticais irregulares/irrestrita	$F_3 > F_2$
Ugai (1988)	Método ordinário das fatias estendido, Bishop modificado, Janbu e Spencer	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 > F_2$, exceto para MOF
Xing (1988)	Equilíbrio limite	c, Φ	Irrestrita/elipsoide	$F_3 > F_2$
Michalowski (1989)	Teorema cinético do limite da plasticidade	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 > F_2$
Seed et al. (1990)	Ad hoc 2d e 3d	c, Φ	Caso particular, Ruptura das colinas Kettleman	$F_3 < F_2$
Leshchinsky and Huang (1991)	Equilíbrio limite e análise variacional	c, Φ	Irrestrita/irrestrita	$F_3 > F_2$

Fonte: Adaptado de Duncan (1996)

5. Materiais e Métodos

5.1 O Talude

O talude em estudo está localizado em uma cidade na região central do estado de Minas Gerais. O talude é natural e compõe-se basicamente por 4 camadas de solos, argila, silte argiloso-arenoso, silte areno-argiloso e pedregulhos. Considerando a reduzida extensão do talude, cerca de 6 metros de altura e 120 metros de comprimento, optou-se pela execução de apenas seis sondagens.

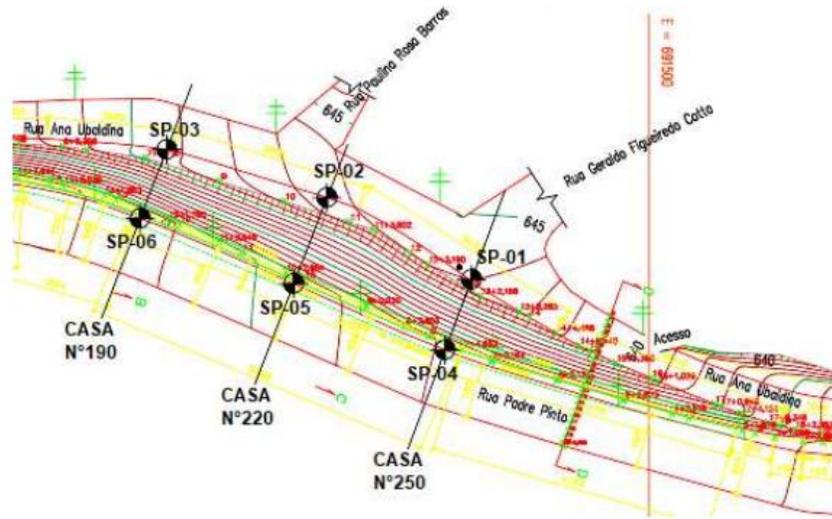
Nas Figura 6 e Figura 7 estão representados a localização dos furos de sondagem em campo obtidas no talude. As coordenadas e elevações foram obtidas através de GPS (Garmin GPSmap 62sc), e estão sujeitas às variações do aparelho e condições climáticas.

Figura 6 - Localização furos de sondagem



Fonte - Relatório de Sondagem

Figura 7 - Croqui de localização dos furos de sondagem



Fonte - Relatório de sondagem

5.2 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho tem como ponto de partida o levantamento topográfico do talude em estudo, etapa essencial para a construção do modelo geotécnico e para o georreferenciamento das sondagens. A topografia fornece a geometria superficial do terreno, permitindo a inserção precisa dos dados nos softwares de análise. Para o tratamento e interpretação topográfica, foi utilizado o software Deswik.CAD, que possibilita a representação fiel da superfície do terreno, a partir dos dados do levantamento planimétrico e altimétrico feitos *in loco*.

Com a superfície topográfica consolidada no CAD, procede-se à exportação dos dados para o software Slide3 (Rocscience), onde se inicia a etapa de modelagem tridimensional. A partir dos dados de sondagem, os furos são posicionados conforme as coordenadas X, Y e Z fornecidas pelo CAD e pelos relatórios técnicos, sempre com atenção às profundidades atingidas em cada furo. Essa etapa exige rigor na conferência dos dados, pois qualquer inconsistência pode comprometer a precisão da definição dos estratos do solo.

Em seguida, dá-se início à etapa de identificação e interpretação dos estratos geológicos, com base nas amostras de solo e rocha coletadas em cada furo de

sondagem. Essas amostras, comumente, são submetidas a ensaios laboratoriais voltados à determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo ou da rocha. O principal objetivo desses ensaios é a caracterização mineralógica e mecânica dos materiais, permitindo a definição dos parâmetros de resistência.

Quando há uma quantidade significativa de ensaios, os resultados obtidos tendem a apresentar maior confiabilidade nos parâmetros de resistência. Por outro lado, em situações com número reduzido de ensaios, os parâmetros podem ser estimados com base em referências da literatura técnica. É válido ressaltar que ainda que os ensaios permitam a identificação dos parâmetros de resistência das amostras, é recomendável a consulta complementar à literatura.

Vale destacar que a realização de um número elevado de testes pode aumentar os custos e o tempo de execução do projeto. Além disso, devido às limitações do número de amostras, variações e desvios de parâmetros, há projetos que se optam por não realizar determinados ensaios.

Com a caracterização do solo, são definidos os critérios de resistência, essenciais para a modelagem geotécnica. Neste estudo, adotou-se os critérios de resistência de Mohr-Coulomb, cujos parâmetros são a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). Esses valores alimentam os modelos computacionais e influenciam diretamente na precisão das análises bidimensionais e tridimensionais, impactando no cálculo do fator de segurança, e por consequência, na estabilidade do talude.

Com os estratos definidos e a inserção dos respectivos parâmetros em cada furo, observa-se a presença de água nas amostras. Quando identificada, registra-se a profundidade em que a água foi encontrada em cada furo. Essa verificação é de suma importância, pois a saturação do solo pode influenciar significativamente os resultados, divergindo expressivamente daqueles obtidos em solos não saturados.

Com a inserção de todas as informações provenientes da topografia e das sondagens, procede-se à seleção do método de identificação das superfícies de ruptura, apresentada no software sob o nome *Slip Surface Options*. Nessa etapa, o usuário pode optar entre três abordagens distintas para a geração das superfícies: busca clássica, superfícies definidas pelo usuário e busca inteligente. Além disso, é possível aprimorar a

eficiência da análise por meio da configuração do método de busca e da definição do número de falhas a ser considerado, o que contribui para uma avaliação robusta da estabilidade do talude.

Finalmente, procede-se à escolha do método de fatias, o qual será empregado no cálculo do fator de segurança, permitindo avaliar a estabilidade do talude com base nos parâmetros previamente definidos.

Para as análises bidimensionais, são realizadas seções transversais ao longo do talude, permitindo a avaliação da estabilidade em diferentes setores. Como os softwares utilizados pertencem ao mesmo grupo, os cortes podem ser gerados de forma integrada no Slide3 e facilmente exportados para o Slide2. Como na análise tridimensional, também é possível optar pelo método de fatias, o que permite a realização das análises bidimensionais e cálculo de diferentes fatores de segurança para uma mesma superfície.

6. Resultados e Discussões

6.1 Superfície Topográfica e Geometria

No presente trabalho, embora a topografia já estivesse finalizada, foi processada no software Deswik CAD, visando à depuração e organização dos dados, garantindo maior precisão na exportação para os softwares das análises bidimensionais e tridimensionais.

A Figura 8 apresenta a planta do talude, incluindo a disposição dos furos de sondagem.

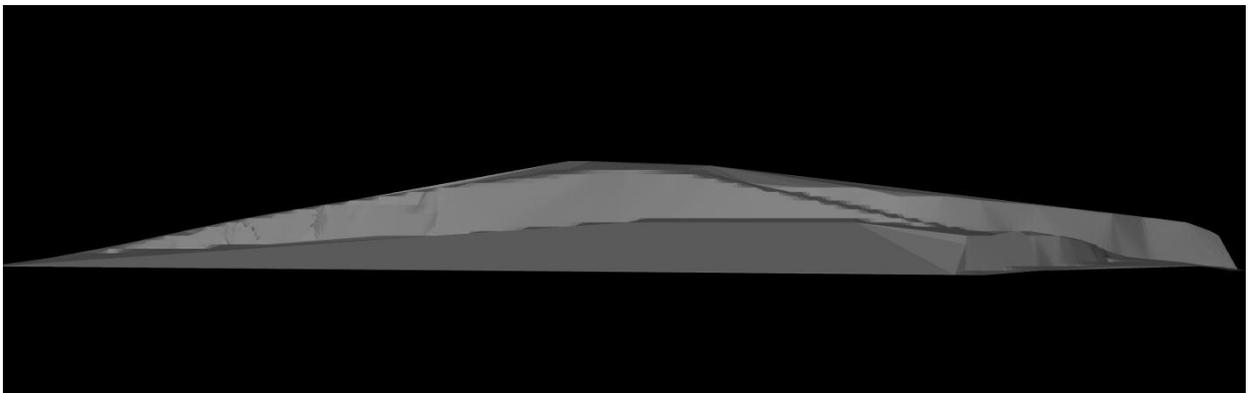
Figura 8 - Planta topográfica do talude e vias no Deswik.CAD



Fonte - A autora (2025)

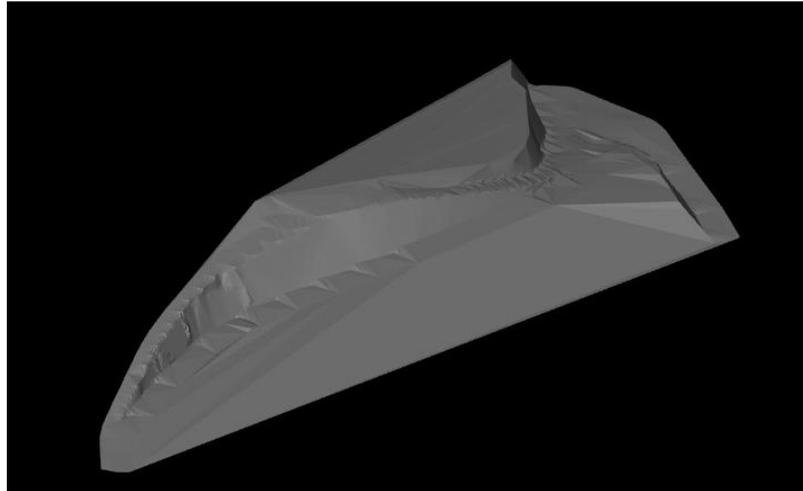
Como parte do processo de geração da superfície, foram selecionados os pontos representativos das coordenadas planimétricas e altimétricas. Em seguida, aplicou-se a função *tessellate* para desenhar a malha da superfície, que será utilizada nas análises subsequentes. As Figura 9 e Figura 10 apresentam a superfície topográfica concluída, preparada para exportação ao Slide3.

Figura 9 - Vista frontal da superfície do talude no Deswik.CAD



Fonte - A autora (2025)

Figura 10 - Vista superior da superfície do talude no Deswik.CAD



Fonte - A autora (2025)

Com a superfície devidamente exportada para o Slide3, procede-se à etapa de posicionamento dos furos de sondagem, permitindo a especificação das profundidades. A Tabela 8 – Profundidade dos furos apresenta as profundidades correspondentes aos furos, designados como SP-01 a SP-06.

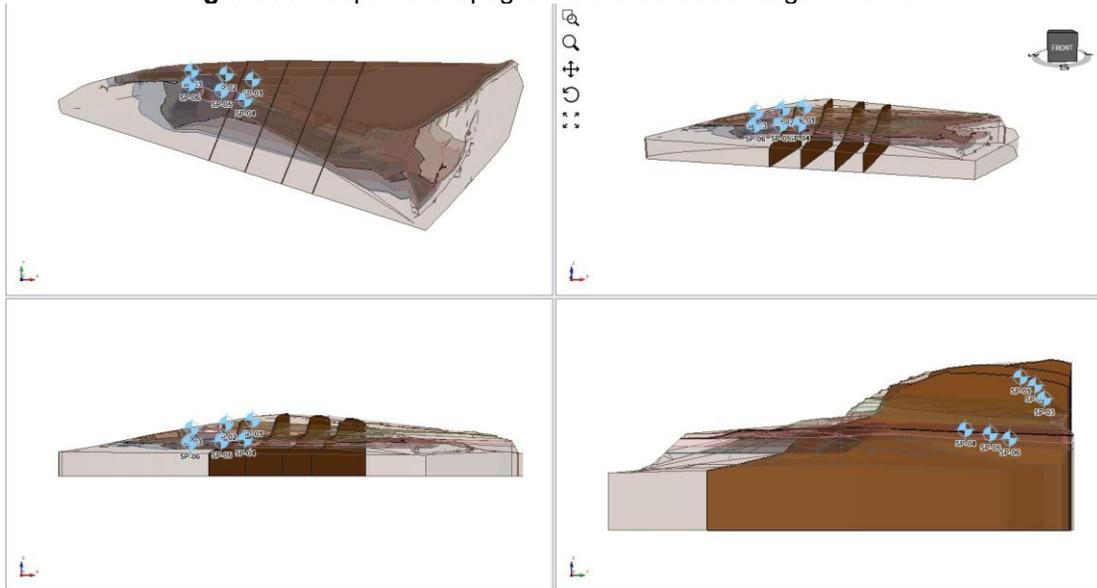
Tabela 8 – Profundidade dos furos

Furo	Profundidade (m)
SP-01	18,07
SP-02	15,10
SP-03	13,09
SP-04	11,05
SP-05	12,08
SP-06	8,09
Total	77,48

Fonte - Adaptado de Relatório de Sondagens (2022)

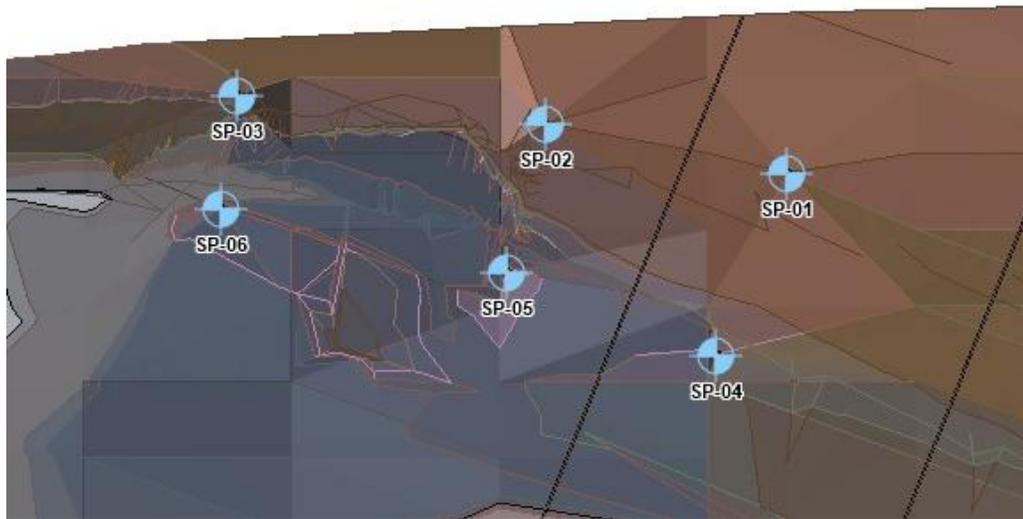
As Figura 11Figura 12Figura 13 exibem a superfície topográfica juntamente com os furos de sondagem e suas respectivas profundidades, já inseridos no Slide3.

Figura 11 - Superfície topográfica e furos de sondagem - Slide3



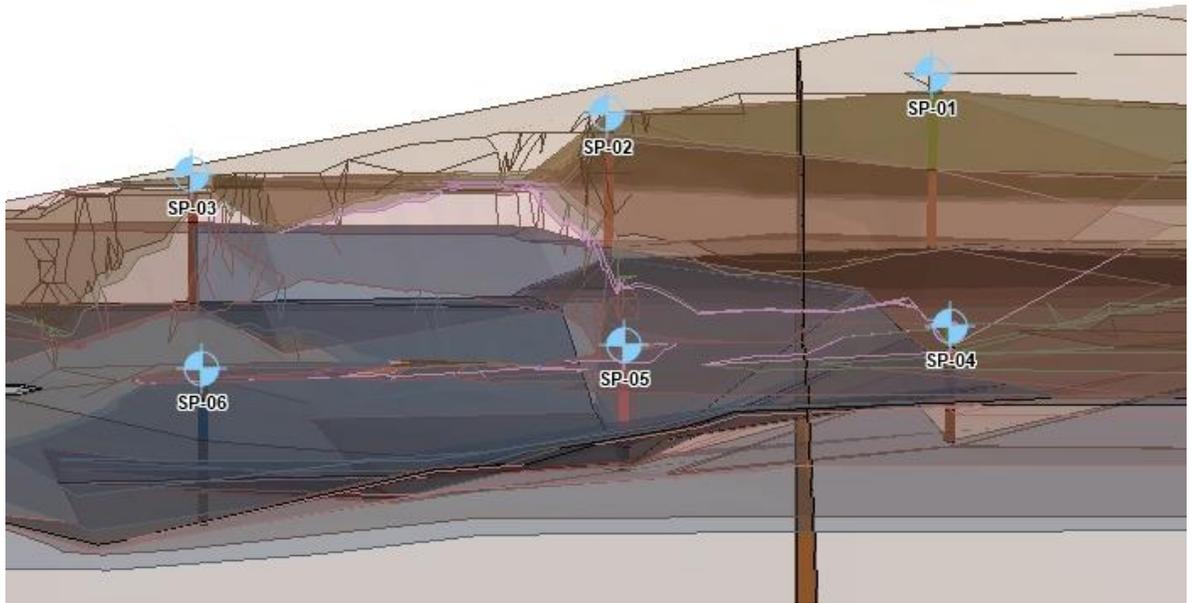
Fonte - A autora (2025)

Figura 12 - Superfície topográfica e furos de sondagem vista superior - Slide3



Fonte - A autora (2025)

Figura 13 - Superfície topográfica e furos de sondagem vista frontal - Slide3



Fonte - A autora (2025)

Após a definição da superfície, procede-se à inserção dos estratos do solo. Na seção a seguir, são apresentadas a determinação das camadas de solos e seus respectivos parâmetros de resistência.

6.2 Determinação dos Parâmetros de Resistência do Solo

O talude em estudo foi investigado por meio de 6 sondagens à percussão realizadas em diferentes setores do talude. Cada furo apresentou entre quatro e oito estratos distintos, totalizando 30 camadas inicialmente identificadas. A análise dos valores de resistência à penetração (N_{SPT}), juntamente às descrições litológicas contidas no relatório, permitiu a identificação de padrões de comportamento geomecânico entre as camadas.

Considerando a similaridade observada entre os perfis, foi possível agrupar os estratos em conjuntos com propriedades geotécnicas semelhantes, reduzindo o número de unidades representativas de 30 para 9.

Para a inferência dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de cada grupo de solo foi adotada a metodologia proposta por Joppert (2017). A Tabela 9 apresenta os nove grupos de materiais definidos, juntamente com os respectivos parâmetros de resistência e peso específico.

Tabela 9 - Estratos e parâmetros de resistência

Material	Peso Específico [t/m ³]	Ângulo de atrito (°)	Coesão [tf/m ²]
Argila Siltosa Rija	1,9	24	2
Silte Argiloso Muito Mole	1,7	25	3
Silte Argilo-Arenoso Micáceo Médio a Rijo	1,9	24	3
Silte Argilo-Arenoso com Cascalho	1,9	28	3
Pedregulhos	2	45	2
Silte Argilo-Arenoso Micáceo Rijo a Duro	2	25	4
Silte Areno-Argiloso Micáceo Medianamente Compacto a Compacto	2.1	25	3
Silte Areno-Argiloso Micáceo Muito Compacto	2.1	28	4
Silte Argilo-Arenoso Micáceo Duro	2	25	5

Fonte – A autora (2025)

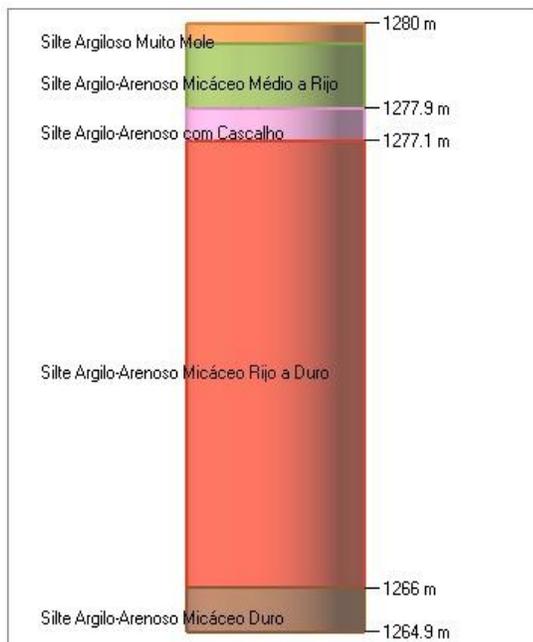
As Figura 14 a Figura 19, apresentam os perfis estratigráficos resultantes da inserção dos materiais já agrupados e identificados em cada furo de sondagem.

Figura 14 – Estratos SP-01



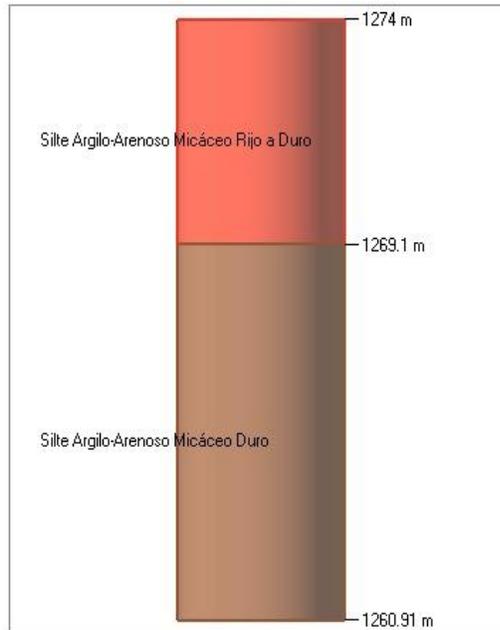
Fonte – A autora (2025)

Figura 15 - Estratos SP-02



Fonte – A autora (2025)

Figura 16 - Estratos SP-03



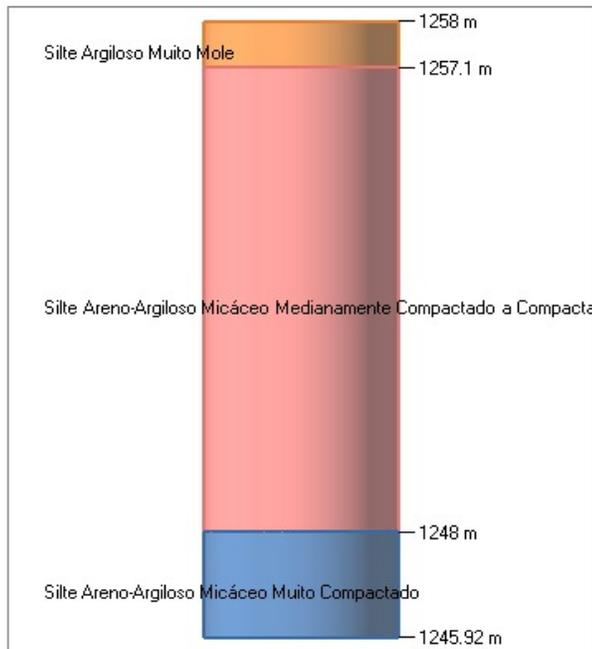
Fonte – A autora (2025)

Figura 17 - Estratos SP-04



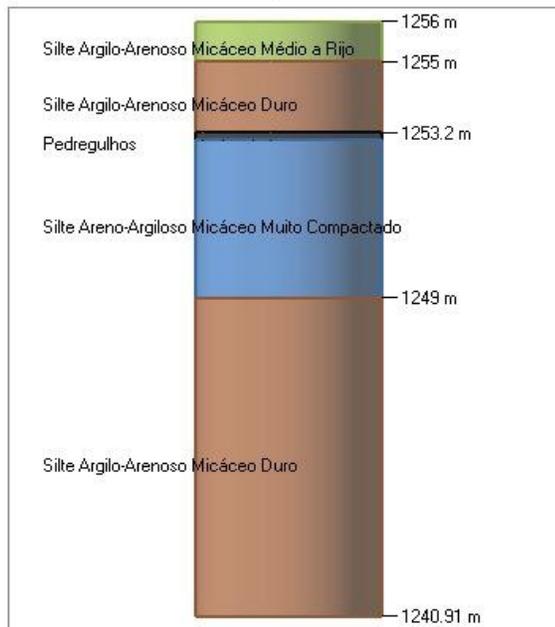
Fonte – A autora (2025)

Figura 18 - Estratos SP-05



Fonte – A autora (2025)

Figura 19 - Estratos SP-06



Fonte – A autora (2025)

Durante a execução das sondagens, não foi observada a presença de água em nenhum dos furos realizados. Dessa forma, na construção do modelo bi e tridimensional, considerou-se a ausência de nível d'água, adotando-se nível freático nulo.

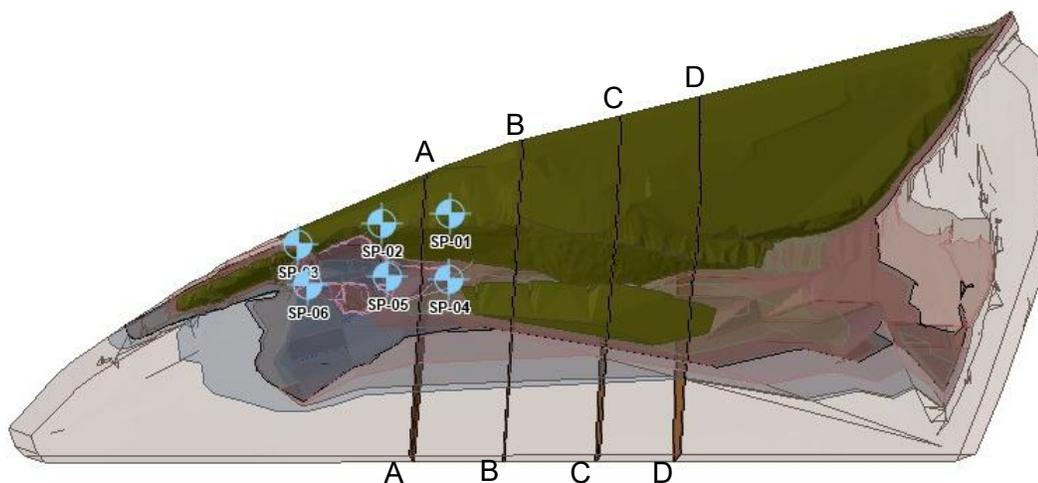
Por fim, o software identifica e delimita as camadas presentes no talude. No entanto, é importante destacar que, nas análises bidimensionais, nem todos os estratos geológicos serão representados, devido à simplificação inerente ao modelo adotado.

6.3 Análise de Estabilidade 2D

Para a realização das análises no Slide2, foi necessário definir seções transversais do talude. Esses cortes foram elaborados previamente no Slide3, que já continha as camadas devidamente modeladas, e posteriormente exportados para o ambiente do Slide2.

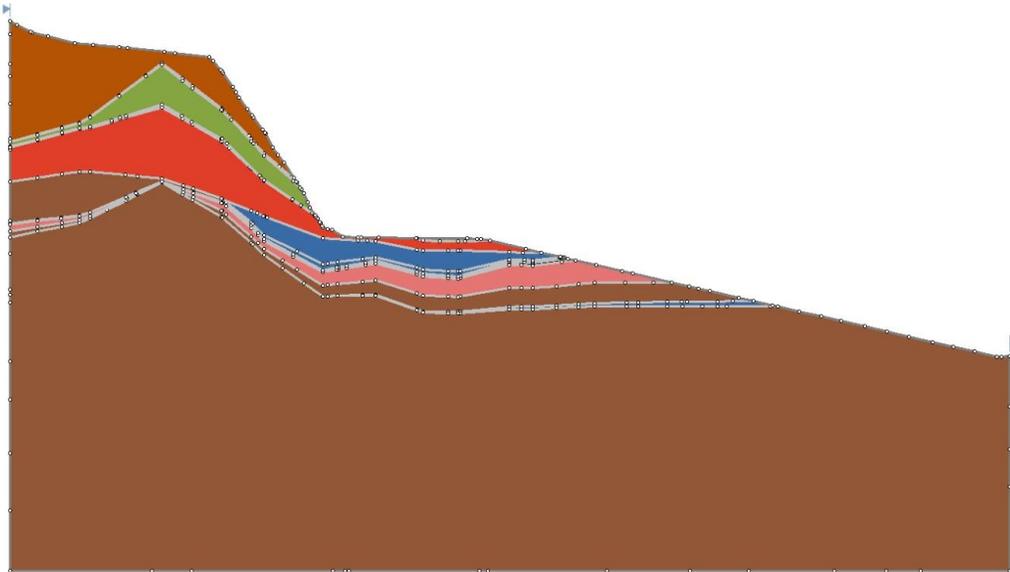
Para executar as análises bidimensionais, optou-se pelo método GLE/Morgenstern-Price, com a opção de busca da superfície de ruptura definida como circular. Não foram admitidos ângulos de entrada e saída, nem profundidade e volume mínimos para a seção de ruptura. As Figura 20 Figura 24 apresentam as seções transversais feitas no talude.

Figura 20 - Localização das seções no talude



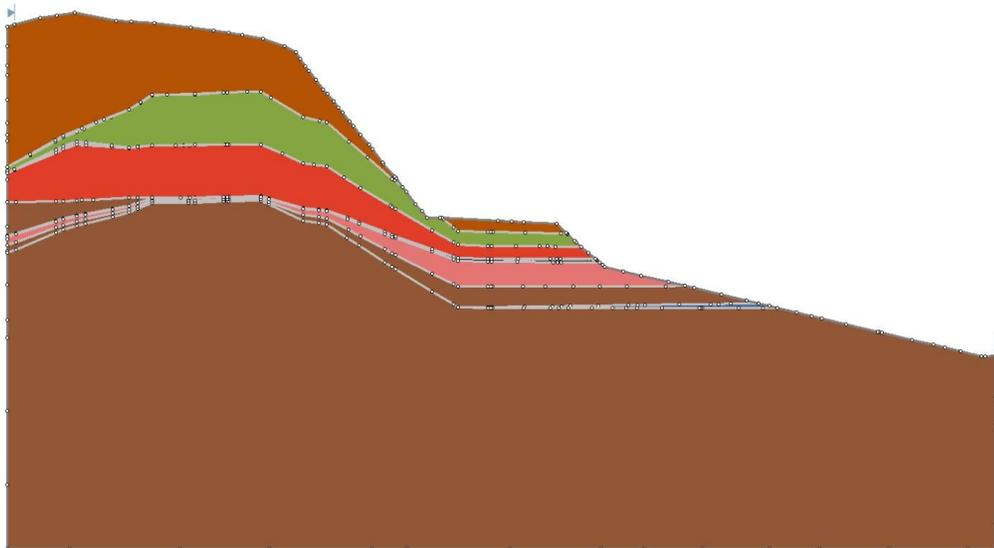
Fonte – A autora (2025)

Figura 21 - Seção transversal do talude A-A



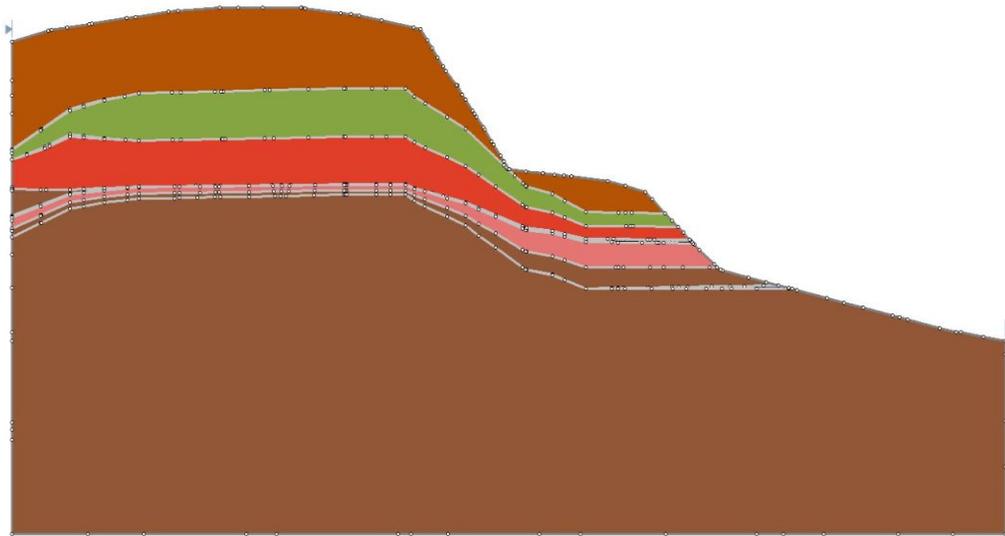
Fonte - A autora (2025)

Figura 22 - Seção transversal do talude B-B



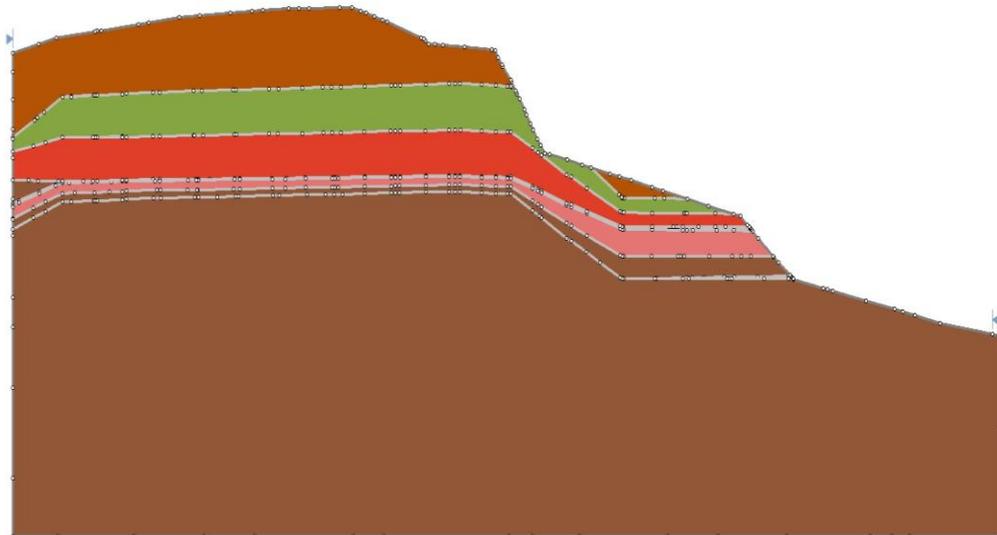
Fonte - A autora (2025)

Figura 23 - Seção transversal do talude C-C



Fonte - A autora (2025)

Figura 24 - Seção transversal do talude D-D



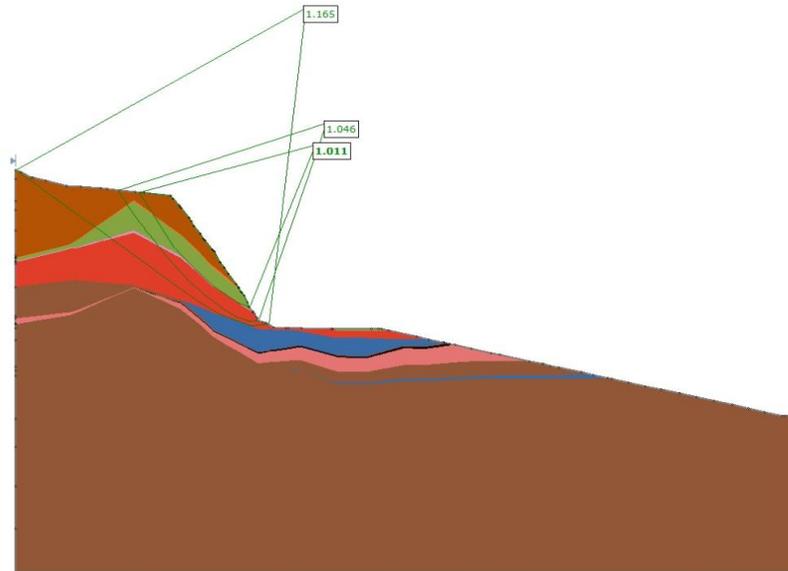
Fonte - A autora (2025)

6.3.1 Condições de poropressão nula

A análise inicial foi feita considerando o talude em sua condição natural, assumindo ausência de poropressão, ou seja, com pressão neutra igual a zero ($ru = 0$).

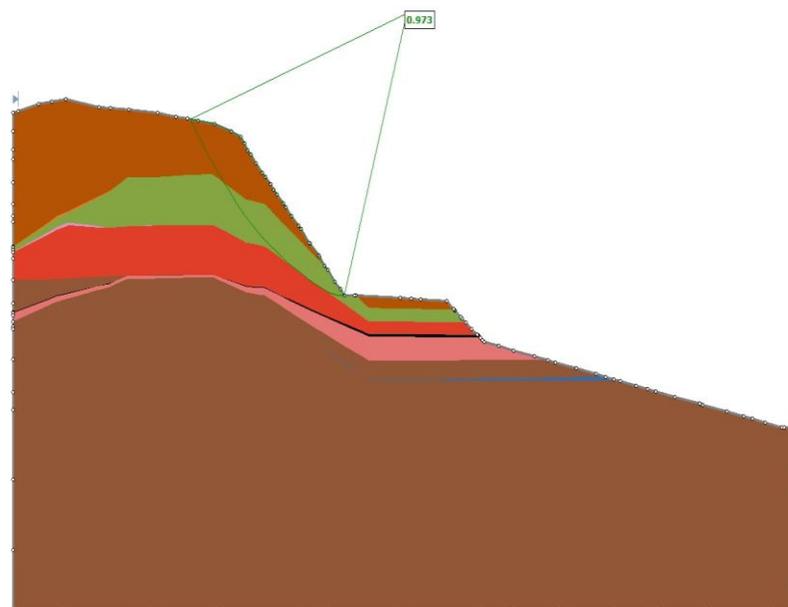
As Figura 25 e Figura 28 apresentam os fatores de segurança obtidos em cada seção e a Tabela 10 apresenta o resumo.

Figura 25 - Seção A-A: fator de segurança para $ru = 0$



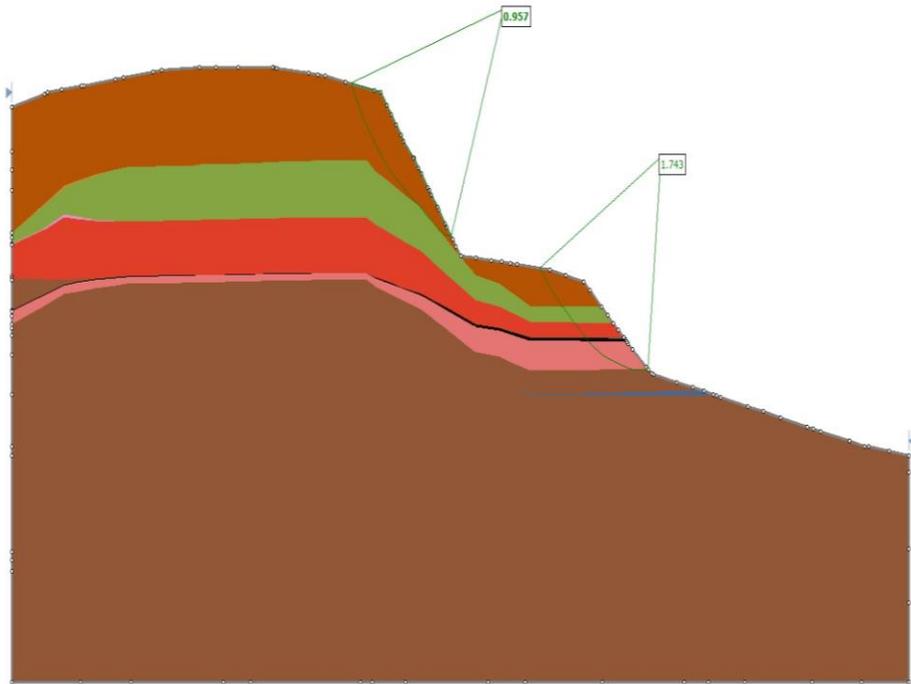
Fonte - A autora (2025)

Figura 26 - Seção B-B: fator de segurança para $ru = 0$



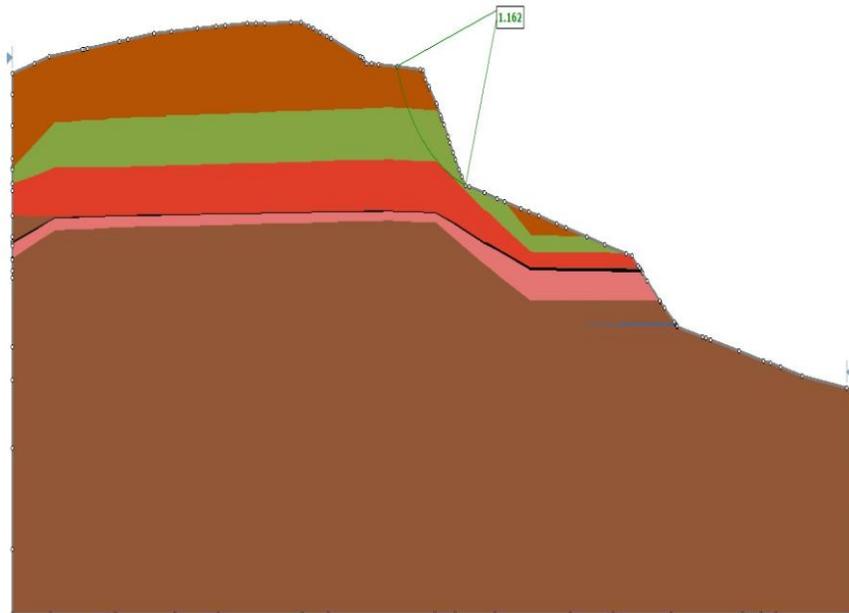
Fonte - A autora (2025)

Figura 27 - Seção C-C: fator de segurança para $ru = 0$



Fonte - A autora (2025)

Figura 28 - Seção D-D: fator de segurança para $ru = 0$



Fonte - A autora (2025)

Tabela 10 - Resumo dos FS para $ru = 0$ - Slide2

Seção	FS
A-A	1,011
	1,046
	1,165
B-B	0,973
C-C	0,957
	1,743
D-D	1,620

Fonte - A autora (2025)

Observa-se que, na seção B-B e em uma das superfícies analisadas na seção C-C, os FS obtidos foram inferiores a 1,0, indicando condições críticas. Na seção A-A, todos os FS encontrados estão abaixo de 1,2, sugerindo instabilidade. Apenas a segunda superfície da seção C-C e a da seção D-D apresentaram valores superiores, indicando estabilidade no talude.

6.3.2 Condições de poropressão 0,5 e 0,9

Com o objetivo de antecipar possíveis condições críticas durante o período chuvoso, foram definidos dois cenários de análise: no primeiro, adotou-se uma poropressão de 0,5; e no segundo, de 0,9. De modo a avaliar a influência da presença de água nos poros do solo sobre a estabilidade do talude.

Da mesma forma, as análises foram executadas adicionando $ru = 0,5$ e $0,9$. As Tabela 11Tabela 12 a seguir apresentam os resultados obtidos em cada análise.

Tabela 11 - Resumo dos FS para $ru = 0,5$ - Slide2

Seção	FS
A-A	0,916
	0,578
	0,548
B-B	0,522
C-C	0,498
	1,159
	0,755
D-D	0,685
	0,977
	1,056

Fonte - A autora (2025)

Tabela 12 - Resumo dos FS para $ru = 0,9$ - Slide2

Seção	FS
A-A	0,206
	0,245
	0,455
	0,496
B-B	0,202
	0,356
C-C	0,165
	0,295
	0,301
D-D	0,344
	0,458
	0,492

Fonte - A autora (2025)

No cenário 1, onde a poropressão é 0,5, é possível observar que os FS variam entre valores próximos de 1 e abaixo de 0,5, indicando instabilidade em todas as seções. No cenário 2, em que a poropressão é 0,9, verifica-se que os FS, em sua maioria, variam entre 0,2 menos que 0,5. Essa redução acentuada demonstra que o aumento da poropressão compromete a estabilidade do talude e torna todas as seções instáveis.

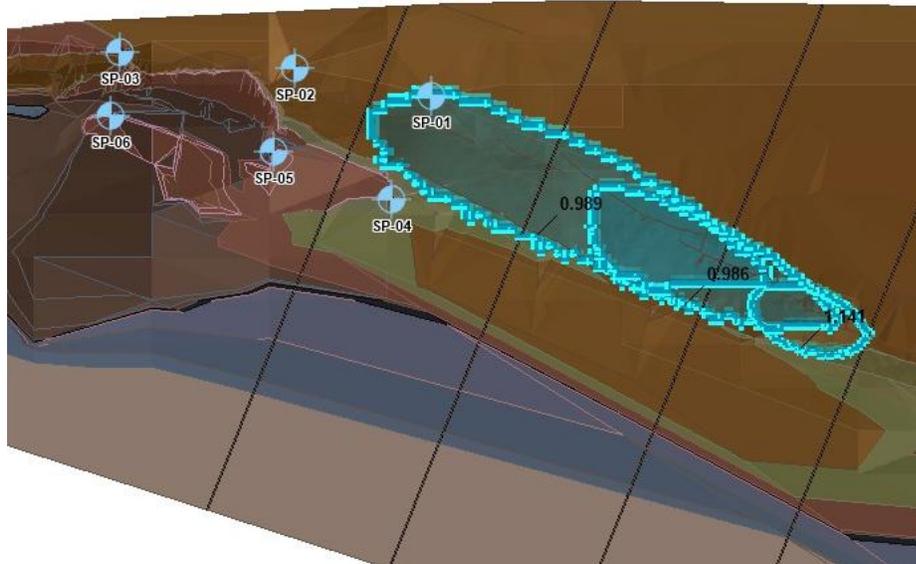
6.4 Análise de Estabilidade 3D

Da mesma forma como feito nas análises anteriores, as análises tridimensionais, feitas no Slide3, também se escolheu o método GLE/Morgenstern-Price, com a opção de busca da superfície de ruptura definida como circular. Não foram admitidos ângulos de entrada e saída, nem profundidade e volume mínimos para a seção de ruptura.

6.4.1 Condições de poropressão nula

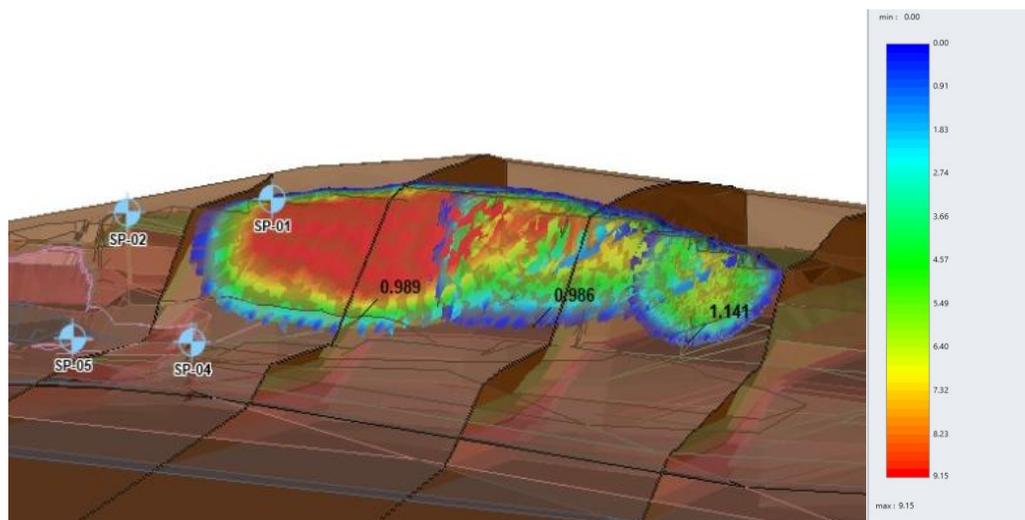
Como adotado na análise bidimensional, a análise tridimensional inicial foi conduzida considerando o talude em sua condição natural, assumindo ausência de poropressão — ou seja, com pressão neutra igual a zero. A seguir, são apresentadas as superfícies de ruptura identificadas e os respectivos fatores de segurança obtidos no talude.

Figura 29 - Fator de segurança para $ru = 0$ - Slide3



Fonte - A autora (2025)

Figura 30 - Contornos de ruptura e FS para $r_u = 0$ - Slide3



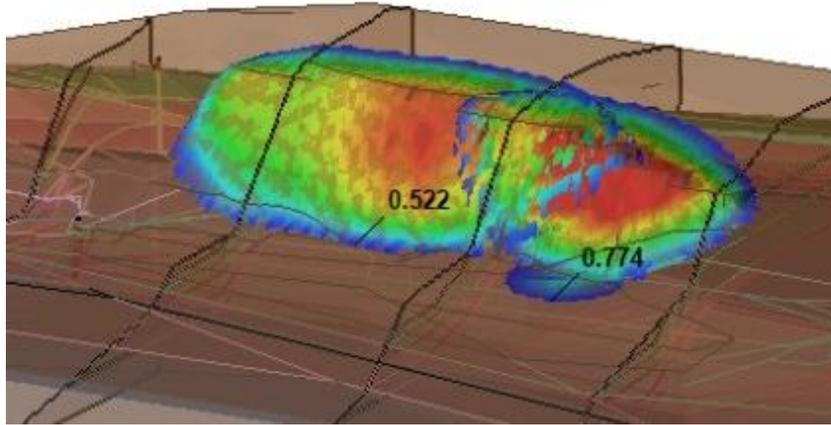
Fonte – A autora (2025)

Resultaram-se 3 superfícies de ruptura e fatores de segurança que variam de 0,986 a 1,141.

6.4.2 Condições de poropressão 0,5 e 0,9

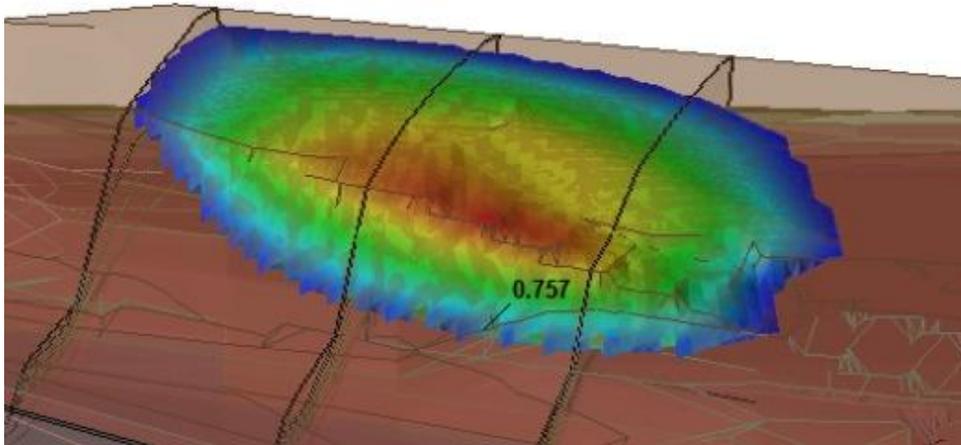
Com o mesmo objetivo da análise bidimensional, foram adotados os mesmos cenários. As Figura 31 e Figura 32 apresentam os resultados obtidos em cada análise.

Figura 31 - Fator de segurança para $ru = 0,5$ - Slide3



Fonte – A autora (2025)

Figura 32 - Fator de segurança para $ru = 0,9$ - Slide3



Fonte – A autora (2025)

6.5 Análise comparativa

Para a análise comparativa, foram selecionados os fatores de segurança críticos de cada seção e método, com o objetivo de identificar os menores valores obtidos entre os cálculos. As Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os resumos dos FS selecionados.

Tabela 13 – Resumo FS Slide2

Método 2D	Fator de Segurança		
	ru= 0	ru= 0,5	ru= 0,9
A-A	1,011	0,548	0,206
B-B	0,973	0,522	0,202
C-C	0,957	0,498	0,301
D-D	1,620	0,685	0,344

Fonte – A autora (2025)

Tabela 14 - Resumo FS Slide3

Método	Fator de Segurança		
	ru= 0	ru= 0,5	ru= 0,9
3D	0,986	0,522	0,757

Fonte – A autora (2025)

No método 2D, observa-se uma variação considerável entre as seções analisadas (A-A, B-B, C-C e D-D), com os fatores de segurança diminuindo progressivamente à medida que a poropressão aumenta. Por outro lado, o método 3D apresenta uma resposta mais estável frente ao aumento de ru. Isso demonstra a sensibilidade dos modelos à presença de água nos poros do solo para o cálculo dos FS.

Na condição inicial, com $ru = 0$, o método 3D apresenta um FS de 0,986, valor intermediário em relação às análises 2D. Comparado com a seção A-A, há uma redução de aproximadamente 2,47%. Já em relação às seções B-B e C-C, o método apresenta acréscimos de 1,33% e 3,03%, respectivamente. Quando comparado à seção D-D a diferença é mais expressiva, sendo 39,14% inferior. Esses resultados indicam que, o corte da seção transversal D-D não é representativo visto às superfícies de rupturas propostas pela análise tridimensional. Já as demais seções indicaram valores compatíveis com o FS

Na condição intermediária em que $ru = 0,5$, as diferenças entre os métodos tornam-se mais sutis. O valor obtido pelo 3D é idêntico ao da seção B-B em 2D. Em comparação à seção A-A observa-se uma redução de 4,74%, enquanto em relação à

seção C-C ocorre um aumento de 4,82%. Já na seção D-D, o FS do método 3D apresenta-se 23,74% inferior, reforçando a ideia da não representatividade da seção.

O cenário mais crítico ocorre sob $ru = 0,9$, representando elevada poropressão. Nessa condição, o FS calculado pelo método 3D é significativamente superior a todos os valores obtidos pelas análises 2D, que variam entre 0,202 e 0,344.

Diferentemente do estudo de Oliveira (2006), no qual as análises tridimensionais apresentaram, em geral, fatores de segurança maiores que os bidimensionais — sendo, portanto, menos conservadoras e mais realistas — neste trabalho não se observam grandes variações entre os métodos, exceto na condição mais crítica de ru . Já Pedrosa *et al.* (2023) conclui que as análises bidimensionais fornecem resultados condizentes com a realidade dos taludes e se mostram conservadoras, por apresentarem valores próximos aos obtidos em análises 3D, porém ligeiramente inferiores. É nesse contexto que este trabalho se insere, visto que os resultados obtidos pelas duas abordagens são semelhantes, com exceção da condição de $ru = 0,9$, na qual o método tridimensional se destaca por apresentar um FS significativamente superior.

7. Conclusão

Esta tese teve como objetivo aplicar e avaliar a metodologia de análise de estabilidade bidimensional e tridimensional, utilizando o método de fatias GLE/Morgenstern-Price sob diferentes condições de poropressão. O estudo foi desenvolvido com base em um conjunto limitado de dados geotécnicos, provenientes de seis sondagens SPT realizadas no talude em questão. Em que, diante dessa limitação, foi necessário estimar os parâmetros de resistência dos solos a partir dos resultados disponíveis.

A análise bidimensional mostrou-se mais acessível em termos de execução, com menor demanda computacional e maior agilidade na construção dos modelos. Já a análise tridimensional, embora mais complexa e exigente em termos de tempo e conhecimento técnico, permitiu uma representação da geometria do talude e da possível superfície de ruptura.

Para as três condições distintas de poropressão ($ru = 0; 0,5$ e $0,9$), observou-se que, em geral, os modelos tridimensionais apresentaram FS ligeiramente superiores. A comparação entre os métodos permitiu verificar que ambos são válidos e úteis, cada um com suas vantagens. A análise bidimensional se destaca pela praticidade e rapidez, sendo ideal para estudos preliminares ou quando há limitação de dados e orçamento. Por outro lado, a tridimensional se mostra essencial para o comparativo e, também, em contextos mais complexos, como taludes de maior porte, solos ou maciços rochosos fraturados e com presença de descontinuidades e presença de nível d'água.

A aplicabilidade dos softwares também foi avaliada, destacando-se a importância de um modelo refinado e da inserção precisa de dados como topografia, nível d'água e os parâmetros de resistência, sendo que a confiabilidade dos resultados obtidos nos está diretamente relacionada ao uso de referências bibliográficas consistentes e criteriosas na estimativa dos parâmetros de resistência do solo.

Por fim, conclui-se que a análise tridimensional atuou como complemento à abordagem bidimensional, contribuindo para uma avaliação mais abrangente da estabilidade do talude. Os fatores de segurança obtidos em ambas as metodologias apresentaram resultados próximos, diferentemente do que é relatado em parte da literatura, onde se observam discrepâncias mais acentuadas entre os modelos. Dessa forma, entende-se que, no contexto deste trabalho, a análise bidimensional não pode ser caracterizada como uma abordagem conservadora.

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029: **Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro, 2017.

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

ALONSO, U. R. **Exercícios de fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

BORCHARDT, N. (2012) **Análise da estabilidade de taludes por retroanálise do rio Paute: Aplicação nos estudos construtivos da usina hidroelétrica Mazar – Equador**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

BOTELHO, Manoel Henrique C.; JR., Jarbas Prado de F.; PAULA, Lyrio Silva de. **ABC da topografia: para tecnólogos, arquitetos e engenheiros**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. E-book. p.17. ISBN 9788521211433. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521211433/>.

DUNCAN, J. M. **State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes**. Journal of Geotechnical Engineering, 1996.

DUNCAN, J., WRIGHT, S. and BRANDON, T. **Soil Strength and Slope Stability**. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2014.

DOMINGOS, V. H. **Análise Tridimensional De Estabilidade De Taludes Utilizando O Método Do Equilíbrio Limite**, Goiânia, 2016.

FIORI, Alberto P.; CARMIGNANI, Luigi. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Editora UFPR, 2001.

FREDLUND, Murray D.; FREDLUND, Delwyn G.; ZHANG, Lulu. **Moving from 2D to a 3D Unsaturated Slope Stability Analysis**. 2015.

Godoy, N. S. **Fundações: Notas de aula, Curso de Graduação, São Carlos (SP)**. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972.

Godoy, N. S. **Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático**. (*Estimate of the load capacity of pilings from the results of a static penetrometer*). Lecture given at the Engineering School of São Carlos USP, 1983.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1984.

JOPPERT JR, IVAN. **Fundações e Contensões de Edifícios** – São Paulo: Pini ISBN 978-85-7266-177-5, 2007. 221p.

MASSAD, Faïçal. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Cemaden registra recorde de alertas e mais de 1,6 mil ocorrências de desastre no Brasil em 2024**. Brasília: MCTI, 10 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/01/cemaden-registra-recorde-de-alertas-e-mais-de-1-6-mil-ocorrencias-de-desastre-no-brasil-em-2024>.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/index.xhtml>.

MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. **Justiça acata solicitações do MPMG e obriga Jaguar Mining a cumprir medidas emergenciais por deslizamento de pilha de rejeito.** Belo Horizonte: MPMG, 10 dez. 2024. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/justica-acata-solicitacoes-do-mpmg-e-obriga-jaguar-mining-a-cumprir-medidas-emergenciais-por-deslizamento-de-pilha-de-rejeito.shtml>.

MOROTE, C. H. S. (2006). **Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo sob Carregamento Sísmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MURRIETA, Pedro. **Mecânica dos Solos.** Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. E-book. p.74. ISBN 9788595156074.

PEDROSA, P, T. VELLOSO, R. Q. SIEIRA, A. C. C. F. **Análises de estabilidade por equilíbrio limite em modelos bi e tridimensionais.** Artigo Geotecnia N°158, 2023.

READ, J., & STACEY, P. **Guidelines for Open Pit Slope Design.** 2009.

SANTOS, A. M. **Predição da condição de estabilidade de taludes de mina por meio da estatística multivariada.** Dissertação de mestrado. Ouro Preto, 2016.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações na engenharia de fundações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SCHNAID, F. ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações na engenharia.** 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Textos, 2025.

Teixeira, A. H. (1996) **Projeto e execução de fundações.** In: Anais do SEFE. São Paulo: [s.n.]. v. 1.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. **Rock slope engineering.** 4 ed. US: CRC Press, 2004.

ZHANG, L., FREDLUND, M., FREDLUND, D.G., Lu, H., and WILSON, G.W. (2015). **The Influence of the Unsaturated Soil Zone on 2-D and 3-D Slope Stability Analyses**, Elsevier - Engineering Geology, May 14, 2015.