

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FÁTIMA PERIUS

**APLICAÇÃO DO SLIDE2 E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM UM ESTUDO DE CASO
NA SERRA GAÚCHA**

Alegrete

2025

FÁTIMA PERIUS

**APLICAÇÃO DO SLIDE2 E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM UM ESTUDO DE CASO
NA SERRA GAÚCHA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur Hartmann

Coorientador: Jaelson Budny

Alegrete

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P441a Perius, Fátima

APLICAÇÃO DO SLIDE2 E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM UM ESTUDO DE CASO NA SERRA GAÚCHA / Fátima Perius.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2025.

"Orientação: Diego Arthur Hartmann".

1. Estabilidade de taludes. 2. Análise geotécnica. 3. Fator de segurança. 4. Movimento de massa. 5. Modelagem computacional. I. Título.

FATIMA PERIUS

APLICAÇÃO DO SLIDE2 E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM UM ESTUDO DE CASO NA SERRA GAÚCHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA - Coorientador

Profa. Dra. RAQUEL MARIANO LINHARES - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 23:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 13:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL MARIANO LINHARES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 14:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1777891** e o código CRC **AA3AF5F8**.

Dedico todo e qualquer sucesso meu aos meus pais que, com mãos calejadas e corações generosos, cultivaram em mim sonhos e valores.

AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha gratidão a Deus, por me conceder saúde e determinação, permitindo-me superar cada desafio e guiando meus passos nos momentos de incerteza.

Aos meus pais, Loiva Maria Theobald Perius e Salesio Perius, meus alicerces e fontes de amor, apoio e sabedoria. Foram eles que, apesar de não terem tido a oportunidade de se formar, sempre fizeram tudo o que puderam para garantir a minha educação. Desde me ensinarem a ler, escrever e fazer contas no jardim de infância até oferecerem todo apoio durante minha graduação, sem medir esforços. Sou profundamente grata por tudo.

Aos meus irmãos, Renã Perius e Raí Perius, minhas inspirações de persistência e honestidade, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo palavras de incentivo, carinho e cumplicidade.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado em cada momento, com apoio emocional, conselhos e risadas. Sou grata pelo companheirismo, pela troca de conhecimentos e pelas experiências compartilhadas.

Ao meu orientador, Prof. D. Sc. Diego Arthur Hartmann, e ao meu coorientador, Prof. D. Sc. Jaelson Budny, minha gratidão pela paciência e contribuições ao longo de todo o processo. Suas sabedoria e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço por me guiarem com tanto empenho e por compartilharem seus conhecimentos.

RESUMO

Diversos municípios localizados na Serra Gaúcha têm enfrentado desafios relacionados ao relevo acidentado, especialmente após os deslizamentos causados pelas intensas chuvas de maio de 2024. Tais eventos destacam a necessidade de estudos técnicos voltados à prevenção de desastres geológicos e à garantia de segurança em obras futuras. Diante deste cenário, este trabalho realizou uma análise da estabilidade de taludes em um trecho da zona rural do município de Carlos Barbosa, nomeado Forromeco 1. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do solo de uma área de instabilidade das quais foram obtidas propriedades necessárias para simulações de estabilidade. Buscou-se verificar o fator de maior influência dentre diferentes inclinações do terreno, níveis d'água, espessuras das camadas do solo, além de terem sido conduzidas análises estatísticas, ajudando a melhor compreender as propriedades hidráulicas e mecânicas do solo em situações críticas e os riscos associados a deslizamentos. Foram realizadas 81 simulações no *software* Slide2, cujos fatores de segurança variaram entre 0,272 e 1,574, com destaque para o impacto negativo do nível d'água. A análise estatística permitiu desenvolver um modelo de regressão linear com coeficiente de determinação de 0,97, validando a confiabilidade dos dados. Pode-se identificar o nível d'água como o parâmetro mais crítico para a instabilidade dos taludes simulados, reforçando a importância de sistemas de drenagem eficientes em áreas suscetíveis.

Palavras-Chave: Estabilidade de taludes; análise geotécnica; fator de segurança; movimento de massa; modelagem computacional.

ABSTRACT

Several municipalities located in the Serra Gaúcha region have faced challenges related to steep terrain, especially after the landslides caused by the intense rainfall in May 2024. These events highlight the need for technical studies aimed at preventing geological disasters and ensuring safety in future construction projects. In this context, this study conducted a slope stability analysis in a rural area of Carlos Barbosa, known as Forromeco 1. Disturbed and undisturbed soil samples were collected from an unstable area, from which the necessary properties for stability simulations were obtained. The study aimed to identify the most influential factor among different slope inclinations, water levels, and soil layer thicknesses. Statistical analyses were also carried out to better understand the hydraulic and mechanical behavior of the soil under critical conditions and the risks associated with landslides. A total of 81 simulations were performed using Slide2 software, with safety factors ranging from 0.272 to 1.574, highlighting the negative impact of elevated water levels. Statistical analysis enabled the development of a linear regression model with a coefficient of determination of 0.97, validating the reliability of the data. Groundwater level was identified as the most critical parameter for the instability of the simulated slopes, reinforcing the importance of efficient drainage systems in susceptible areas.

Keywords: Slope stability; geotechnical analysis; safety factor; mass movement; computational modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimentos de massa: (a) Queda; (b) Tombamento; (c) Escorregamento rotacional; (d) Escorregamento translacional; (e) Espalhamento lateral; (f) Fluxo. ...	16
Figura 2 – Fluxo de detritos.....	19
Figura 3 – Representação de uma fatia segundo o método de Fellenius.	21
Figura 4 – Representação de uma fatia segundo o método de Bishop.....	22
Figura 5 – Representação de uma fatia segundo o método de Janbu.....	23
Figura 6 – Representação de uma fatia segundo o método de Spencer.....	24
Figura 7 – Talude definido pelo método Morgenstern-Price.....	24
Figura 8 – Deslizamentos registrados em maio de 2024.	27
Figura 9 – Fluxograma do programa experimental.....	29
Figura 10 – Mapa geológico da região.	30
Figura 11 – Trecho de amostragem.....	31
Figura 12 – Instabilidade em taludes da região.....	32
Figura 13 – Local de coleta do solo.....	32
Figura 14 – Limites de Atterberg.	33
Figura 16 – Curvas granulométricas das amostras deformadas.	34
Figura 15 – Corpos de prova para ensaio de massa específica natural.....	34
Figura 17 – Esquema representativo do modelo de talude utilizado nas simulações no Slide2.	37
Figura 18 – Condições críticas.....	40
Figura 19 – Comparativo de FS conforme variações de c' , ϕ , B e H_w	42
Figura 19 – Dispersão dos valores previstos x realizados do FS.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica dos sólidos.	33
Tabela 2 – Massa específica natural.	35
Tabela 3 – Caracterização e classificações das amostras.	35
Tabela 4 – Dados de entrada Slide2.	38
Tabela 5 – Modelo estatístico obtido no Statistica8.	43
Tabela 6 – Análise ANOVA	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEMADEN – Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

FS – Fator de Segurança

FSG – Formação Serra Geral

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MEF – Método de Elementos Finitos

MEL – Método do Equilíbrio Limite

NBR – Norma Técnica Brasileira

RS – Rio Grande do Sul

SC – Santa Catarina

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TRB – Transportation Research Board

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo geral	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Estabilidade de taludes	15
2.1.1. Queda.....	17
2.1.2. Tombamento	17
2.1.3. Escorregamento	17
2.1.4. Espalhamentos laterais	18
2.1.5. Fluxos	19
2.2. Métodos de análise	19
2.2.1. Métodos do Equilíbrio Limite	20
2.2.2. Método dos Elementos Finitos.....	25
2.3. Casos de deslizamentos recentes no sul do Brasil	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1. Local de estudo.....	29
3.2. Coleta de amostras deformadas e indeformadas.....	30
3.3. Caracterização e classificação geotécnica.....	33
3.4. Simulações computacionais	36
3.5. Análise estatística	39
4. RESULTADOS	40
4.1. Análise das simulações.....	40
4.2. ANOVA e regressão linear.....	43
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

Taludes são superfícies inclinadas que delimitam um maciço de terra ou rocha, podendo ser naturais ou artificiais. Devido à inclinação dessas superfícies, a massa de solo encontra-se submetida às forças gravitacionais (peso próprio), ao escoamento superficial da água e às condições externas. A componente de gravidade tende a promover a movimentação do solo. Quando esta, somada às demais ações perturbadoras, se igualarem à resistência do solo, esse perde a capacidade de se manter estável (RIBEIRO JUNIOR, 2011).

Movimento de massa é o deslocamento de uma parte da massa de rocha, massa de solo ou composição mista para baixo, ao longo de uma determinada superfície de deslizamento, sob ações dinâmicas internas e externas (DING, 2005).

Os eventos de movimentação de massa são fenômenos geomorfológicos naturais que ocorrem independentemente da presença humana. Com a expansão dos ambientes urbanos, a procura por locais seguros para a construção de estradas e comunidades torna-se cada vez mais difícil devido ao crescimento populacional acelerado observado nos últimos 200 anos (NADALIN, 2018).

Dentre todos os agentes indutores ao escorregamento, a água assume um papel de destaque, sendo a responsável por grande parte desses eventos, aumentando o peso do solo e provocando a redução da tensão efetiva. Por outro lado, a água também tem papel fundamental na estabilidade de taludes, quando a sua quantidade não é suficiente para saturação do solo. Nesse caso, a água pode agir contribuindo para o aumento aparente da resistência do maciço ao criar regiões de solo não saturado, onde a sucção provoca maior interação entre os grãos, melhorando a resistência global do talude (RIBEIRO JUNIOR, 2011).

Na Serra Gaúcha, onde está localizado o município de Carlos Barbosa, as condições climáticas e geomorfológicas fazem com que a região seja especialmente vulnerável aos deslizamentos de terra, principalmente durante períodos de chuvas intensas. Nos anos de 2023 e 2024 foram registrados índices pluviométricos históricos, resultando em solo saturado e favorecendo a ocorrência de movimentos de massa, como observado em diversos municípios do estado.

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2024), durante os meses de abril e junho de 2024, a Sala de Situação do CEMADEN emitiu diversos alertas relacionados a riscos geológicos e hidrológicos. Esses dados evidenciam a

frequência e a relevância desses eventos, destacando a importância do monitoramento contínuo em áreas suscetíveis.

Devido a esses fenômenos, tanto naturais quanto causados pela ação humana, é fundamental a realização de estudos geológicos e geotécnicos antes de novas construções rodoviárias e civis, que visam minimizar desastres causados por instabilidades e evitar prejuízos financeiros e riscos à vida humana. Para isso, são avaliados diversos fatores que influenciam a estabilidade dos taludes, como a inclinação do terreno, o nível da água e a espessura das camadas de solo.

1.1. Objetivo geral

Realizar uma análise paramétrica da estabilidade de taludes por meio de simulações computacionais com o *software* Slide2, utilizando parâmetros geotécnicos representativos da região da Serra Gaúcha.

1.2. Objetivos específicos

- Analisar a influência dos seguintes parâmetros na estabilidade de taludes:
 - Inclinação do talude;
 - Profundidade do nível d'água;
 - Espessura da camada de solo
- Identificar os parâmetros que mais influenciam na estabilidade a partir de uma análise estatística.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estabilidade de taludes

Movimentos de massa são comumente observados em áreas montanhosas após períodos chuvosos intensos ou prolongados, muitas vezes levando a mudanças topográficas significativas, constituindo um risco potencialmente custoso para a vida humana e o ambiente construído. Uma boa compreensão das características e mecânicas dos movimentos de massa é, portanto, de considerável interesse geotécnico (CHEN; LEE, 2003).

Os fatores que afetam a estabilidade de taludes podem ser divididos em duas categorias: condição geológica e fator desencadeador externo. A condição geológica inclui, principalmente, a estrutura das massas de rocha e solo, litologia, relevo, estrutura tectônica, condição hidrogeológica e campo de tensões, sendo a condição material básica e a causa interna do movimento de massa. O fator desencadeador externo inclui, dentre outros, o peso morto do talude, chuva, variação de temperatura, terremoto, carga externa, escavação do talude e explosão artificial, que fornecem a condição dinâmica externa para o movimento de massa. A maioria dos deslizamentos ocorre sob a ação combinada de uma condição geológica específica e um fator desencadeador externo (DING, 2005).

Segundo Ribeiro (2015) os mecanismos deflagradores da ruptura podem ser divididos em redução da resistência ao cisalhamento e aumento da sollicitação. Os fatores que podem influenciar na redução da resistência ao cisalhamento são:

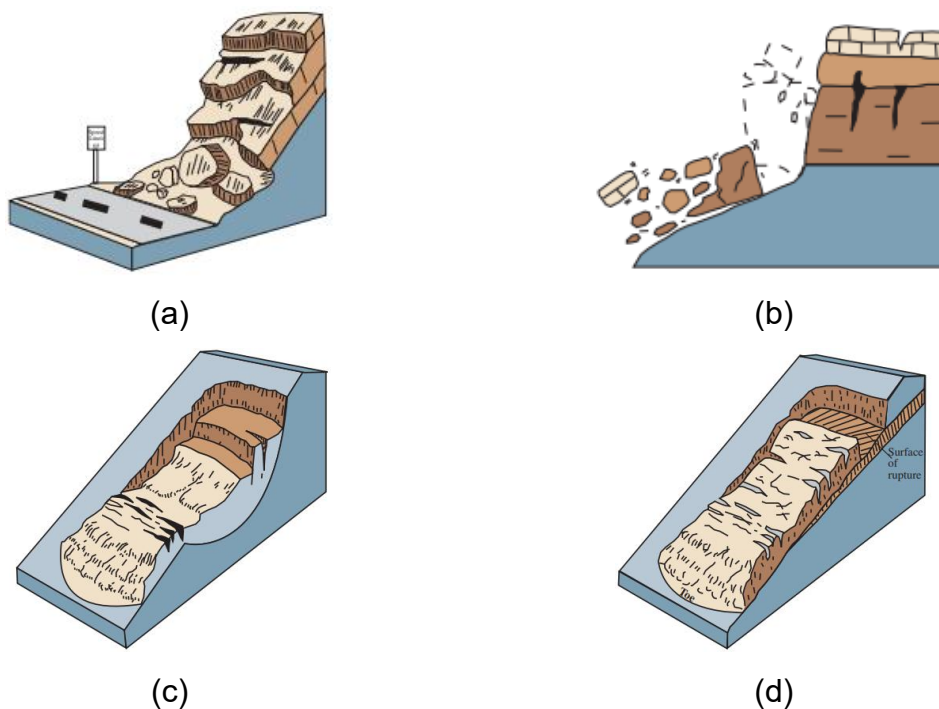
- Características inerentes do material (geometria, estrutura etc.);
- Mudanças ou fatores variáveis causados pela ação do intemperismo;
- Variação das poropressões;
- Elevação do nível d'água por mudanças no padrão natural de fluxo;
- Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimentos e secagens, reduzindo a resistência, infiltração da água em meios não saturados, causando redução das pressões de água negativas (sucção);
- Fluxos preferenciais através de trincas ou juntas, acelerando os processos de infiltração.

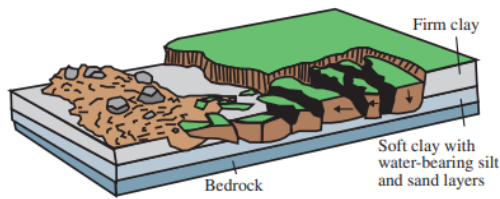
Quanto ao aumento da sollicitação, isso ocorre devido a fatores como:

- Remoção de massa (lateral ou da base), por meio de erosão, deslizamentos ou cortes;
- Sobrecargas devido ao peso da água de chuva, neve, granizo;
- Acúmulo natural de material (depósitos);
- Peso da vegetação;
- Construção de estruturas, aterros;
- Solicitações dinâmicas como terremotos, ondas, vulcões etc., explosões, tráfego, sismos induzidos;
- Pressões laterais, tais como congelamento de água em trincas e material expansivo.

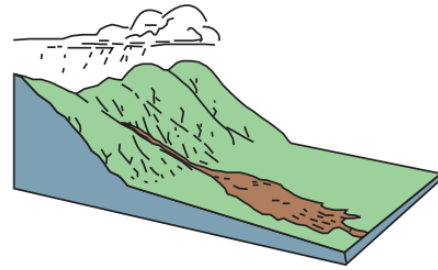
Há diversas classificações para movimentos de massa. A norma ABNT NBR 11682:2009 propõe uma subdivisão em quatro categorias: queda ou rolamento, tombamento, escorregamento e escoamento. Já a classificação de Varnes (1954, 1978) divide os movimentos de massa em seis tipos (Figura 1): quedas, tombamentos, escorregamentos, espalhamentos laterais e fluxos, o sexto tipo seria a combinação de dois ou mais destes movimentos, denominado por ele como complexos.

Figura 1 – Movimentos de massa: (a) Queda; (b) Tombamento; (c) Escorregamento rotacional; (d) Escorregamento translacional; (e) Espalhamento lateral; (f) Fluxo.





(e)



(f)

Fonte: (a) (b) (e) USGS (2004); (c) (d) (f) Highand e Bobrowsky (2008).

2.1.1. Queda

Os movimentos denominados queda (Figura 1a) são extremamente rápidos (m/s) e envolvem blocos e/ou lascas de rocha em movimento de queda livre, instabilizando um volume de rocha relativamente pequeno. A ocorrência deste processo está condicionada à presença de afloramentos rochosos em encostas íngremes, abruptas ou taludes de escavação, sendo potencializados pelas amplitudes térmicas. As causas básicas deste processo são a presença de descontinuidades no maciço rochoso, que propiciam isolamento de blocos unitários de rocha, a subpressão por meio do acúmulo de água, descontinuidades ou penetração de raízes, podendo ser acelerado pelas ações humanas (IPT, 2015).

2.1.2. Tombamento

Um tombamento (Figura 1b) é caracterizado pela rotação para frente de uma unidade ou unidades em torno de algum ponto central, sob as ações da gravidade e forças exercidas por unidades adjacentes ou por fluidos em rachaduras (USGS, 2004). Pode conter rochas, detritos (material mais graúdo) ou terra (material de fina granulação). Sua velocidade pode variar de extremamente lenta (mm/ano) a extremamente rápida (m/s). Dependendo da geometria do material e da orientação e extensão das descontinuidades, os tombamentos podem culminar em quedas de blocos e escorregamentos (NOLA, 2015).

2.1.3. Escorregamento

Segundo Ahrendt (2005), os escorregamentos ocorrem devido à deformação por cisalhamento ao longo de uma ou mais superfícies, envolvendo solo ou materiais

rochosos. As superfícies de deslizamento podem ser visíveis, inferidas ou localizadas em zonas restritas. Esses movimentos podem ser progressivos, começando em uma pequena ruptura, como fendas de tração, e se espalhando até formar uma superfície de ruptura mais ampla.

Escorregamento rotacional (Figura 1c) ocorre quando uma massa de solo ou rocha se desloca ao longo de uma superfície curva, geralmente em taludes com materiais mais coesivos. Esse tipo de falha é caracterizado pela rotação da massa de solo em torno de uma linha ou ponto fixo, formando uma superfície de ruptura que tem uma geometria de arco ou curva. Ocorre mais frequentemente em materiais homogêneos, por conta disto, é o tipo mais comum de escorregamento em aterros. A velocidade pode variar de extremamente lenta (mm/ano), moderada (m/mês) e a rápida (m/h) (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Já em um escorregamento translacional (Figura 1d), Highland e Bobrowsky (2008) relatam que a massa se move para fora, ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana, com pequeno movimento rotacional ou inclinação para trás. Geralmente são mais rasos que os escorregamentos rotacionais. O material no escorregamento pode variar de solo solto e não adensado até grandes placas de rochas, ou ambos. Escorregamentos translacionais comumente ocorrem ao longo de discontinuidades geológicas tais como falhas, junções, superfícies, estratificações, ou o plano de interface entre rocha e solo. A velocidade do movimento pode ser inicialmente lenta (m/ano), mas há muitos em velocidade moderada (m/mês) ou extremamente rápida (m/s).

2.1.4. Espalhamentos laterais

O espalhamento lateral (Figura 1e) ocorre, geralmente, em taludes de baixa inclinação ou em terrenos planos. O modo predominante de movimento é a extensão lateral, acompanhada por fraturas de cisalhamento ou tração. A falha é causada pela liquefação, um processo em que sedimentos saturados, soltos e sem coesão (geralmente areias e siltes) são transformados de um estado sólido para um estado liquefeito. Tais rupturas são comumente acompanhadas de um afundamento generalizado em direção a essa camada inferior. O movimento pode variar de lento (m/ano) a moderado (m/mês), e ocasionalmente ser rápido (m/s), dependendo dos mecanismos deflagradores (USGS, 2004).

2.1.5. Fluxos

É uma forma rápida de movimento de massa, em que solo solto e rochas, e por vezes, material orgânico, se misturam à água e formam lama que escoam talude abaixo (Figura 1f). São geralmente limitados pela dimensão dos taludes em que ocorrem e que facilitam seu movimento descendente. O movimento pode ser rápido (m/h) a extremamente rápido (m/s), dependendo da consistência e do ângulo de inclinação. São geralmente desencadeados por um intenso fluxo de água na superfície, devido a chuvas pesadas ou degelo rápido, que causam erosão e movimentam as rochas e o solo solto, nas regiões inclinadas (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

A Figura 2, encontra-se a representação de um fluxo de detritos ocorrido em maio de 2024, no interior do município de Carlos Barbosa/RS.

Figura 2 – Fluxo de detritos.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2025).

2.2. Métodos de análise

O Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método do Equilíbrio Limite (MEL) são amplamente utilizados na análise de estabilidade de taludes e apresentam abordagens distintas. No MEF são realizadas análises detalhadas de tensões e deformações do solo identificando superfícies de ruptura potenciais com alta precisão, sendo adequado para taludes com geometrias complexas. O MEL é mais simplificado e rápido, sendo o fator de segurança (FS) global calculado com base no equilíbrio entre forças e/ou momentos; requer uma definição prévia da superfície de ruptura, o que reduz sua precisão. Embora o MEF permita considerar propriedades como

anisotropia e variações nas condições de drenagem, o MEL é largamente utilizado para análises preliminares ou situações em que os resultados devem ser obtidos rapidamente, devido à menor demanda de recursos computacionais.

2.2.1. Métodos do Equilíbrio Limite

O MEL consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo ao longo de uma superfície potencial de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. Assume-se que todos os elementos ao longo desta atingem simultaneamente uma condição de fator de segurança (FS) igual a 1 (RIBEIRO, 2015).

O método das fatias é uma técnica geral para análise de taludes, onde a massa de solo é dividida em várias fatias verticais. Cada fatia é analisada considerando forças normais e tangenciais para determinar o equilíbrio do sistema. A partir dele, derivam-se outros métodos como Fellenius, Bishop, entre outros.

Os métodos a seguir são fundamentados, basicamente, nas hipóteses consideradas no equilíbrio de forças nas fatias para obtenção do FS. Por se tratar de um problema matematicamente indeterminado, os métodos diferem nas simplificações realizadas para contornar essa indeterminação.

a) Método Fellenius

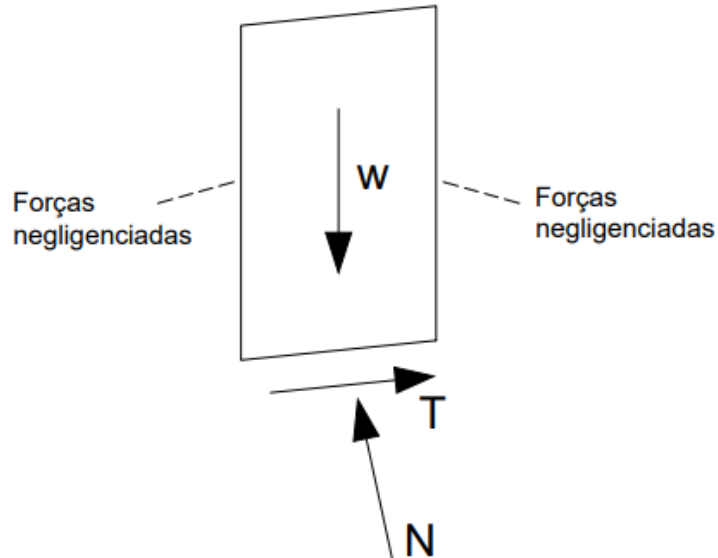
O método de Fellenius pode ser considerado o mais simples, visto que o momento das forças é equilibrado ao redor de um ponto central na base do talude. As interações entre fatias são desconsideradas, o que facilita o cálculo, mas é menos preciso para taludes complexos.

Segundo Gerscovich (2012), o método de Fellenius é conservador, pois tende a fornecer fatores de segurança baixos. Em círculos de deslizamento profundos e com alta poropressão, os resultados podem ser pouco confiáveis. Além disso, nas fatias da região estabilizante recomenda-se anular o termo de tensão efetiva para evitar que essa contribuição negativa reduza o FS de maneira inadequada.

O método de Fellenius é considerado um método de análise de estabilidade simplificado, pois não atende às três equações do equilíbrio estático. Para a determinação do fator de segurança, o método considera apenas o equilíbrio de forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos, e admite

que as forças de contato entre as fatias possuem a mesma inclinação da base da fatia em análise (TELLES, 2015). Na Figura 3 está apresentada uma fatia i genérica com as forças atuantes.

Figura 3 – Representação de uma fatia segundo o método de Fellenius.

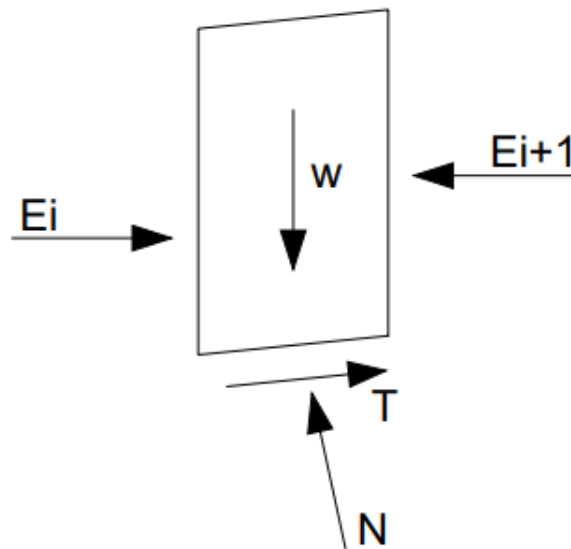


Fonte: Adaptado de Telles (2015).

b) Método Bishop

O método de Bishop foi apresentado em 1955 e tinha como intuito inicial a análise de superfícies circulares, embora possa ser aplicado a superfícies não circulares. Pode ser considerado um aprimoramento do método de Fellenius, levando em consideração as forças normais e a interação entre as fatias. Ele assume um equilíbrio de momentos, mas ignora a componente de forças de cisalhamento entre as fatias, o que simplifica o cálculo sem comprometer muito a precisão em muitos casos. Segundo Telles (2015) o método de Bishop propõe desprezar a componente tangencial das forças entre as fatias, isto é, considera que a resultante entre fatias é horizontal (Figura 4).

Figura 4 – Representação de uma fatia segundo o método de Bishop.

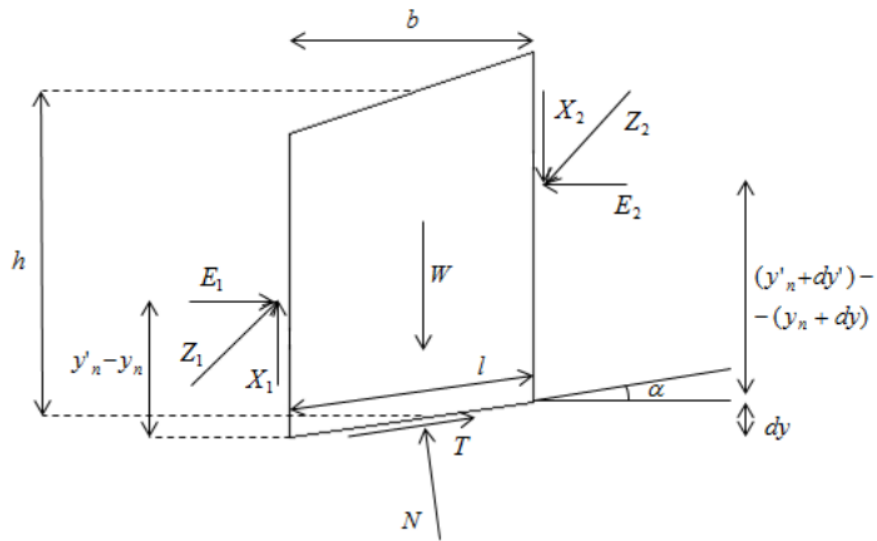


Fonte: Adaptado de Telles (2015).

c) Método de Janbu

O método de Janbu é baseado no equilíbrio de forças horizontais e verticais, mas, diferentemente de Bishop, não considera o equilíbrio de momentos. Permite o uso de superfícies de ruptura não circulares, sendo mais aplicável para geometrias de taludes complexas. Segundo Ferreira (2012), este método permite fazer a análise de estabilidade de um talude admitindo superfícies de ruptura com qualquer forma. O procedimento baseia-se em equações diferenciais, as quais comandam o equilíbrio de forças e momentos da massa acima da superfície adotada. O equilíbrio de momentos é considerado em relação ao ponto médio da base de cada fatia, o que faz com que as contribuições do peso (dW), e força normal (dN) sejam nulas uma vez que atuam nesse mesmo ponto (Figura 5).

Figura 5 – Representação de uma fatia segundo o método de Janbu.

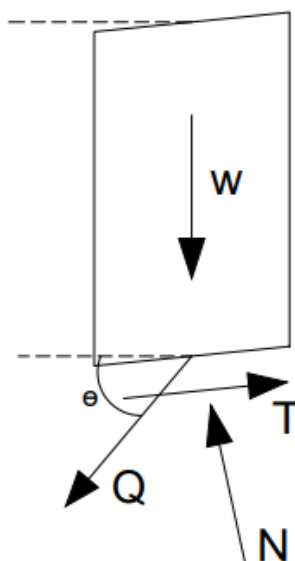


Fonte: Ferreira (2012).

d) Método de Spencer

O método de Spencer é considerado rigoroso, pois equilibra forças e momentos e considera as forças interfatias, ou seja, satisfaz todas as equações de equilíbrio. O método define dois fatores de segurança, sendo um calculado em termos do equilíbrio de forças (F_f), e o outro do equilíbrio de momentos (F_m). Ele é altamente preciso e é usado frequentemente para verificar a estabilidade com condições rigorosas e perfis variados de taludes. Spencer assume a hipótese de que a soma das resultantes das forças de interação entre as fatias é uma força Q_i com inclinação igual a θ (Figura 6).

Figura 6 – Representação de uma fatia segundo o método de Spencer.

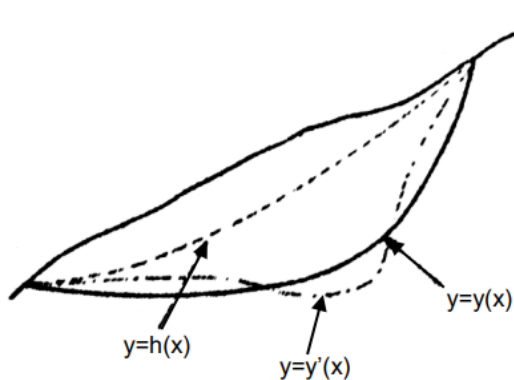


Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).

e) Método de Morgenstern-Price

Morgenstern-Price é um dos métodos mais completos e rigorosos, pois considera o equilíbrio de forças e momentos e permite diferentes perfis de forças interfatias, ou seja, cumpre todas as condições de equilíbrio. A aplicação do método recorre a equações diferenciais que governam o equilíbrio de momentos e o equilíbrio de forças numa fatia. Esse método é aplicável em condições variadas de taludes e em perfis complexos. A Figura 7 representa um talude tal como definido pelo método.

Figura 7 – Talude definido pelo método Morgenstern-Price.



Fonte: Telles (2015).

De acordo com Telles (2015), a hipótese simplificadora proposta pelo método

consiste em se assumir que a razão entre as componentes tangencial e normal da resultante das forças de interação entre as fatias varia ao longo da superfície de ruptura.

2.2.2. Método dos Elementos Finitos

O MEF tem sido uma das principais técnicas de solução numérica aplicadas para aproximar a solução de equações diferenciais que governam problemas da engenharia (KWON; BANG, 2000). É uma abordagem baseada na subdivisão do domínio de interesse em elementos menores, conectados por meio de pontos de interseção.

Clough e Woodward foram os precursores do MEF na engenharia geotécnica ao utilizar o método para o estudo de uma barragem de terra, onde aplicou-se uma lei constitutiva não linear, e a partir desse estudo foi observada as potencialidades do método (CLOUGH e WOODWARD, 1967, apud OLIVEIRA, 2023).

Conforme destacado por Nascimento (2021), o método é amplamente aplicado na análise de estabilidade de taludes, em fundações, escavações e estruturas de contenção, o método permite simular o comportamento do solo em condições variadas, considerando características específicas, como não linearidade tensão-deformação, anisotropia, heterogeneidade, além de modelar taludes e perfis de solo com geometrias complexas, condições de contorno reais e o efeito das etapas construtivas.

Para simular o comportamento real do solo, o MEF utiliza modelos constitutivos que representam as propriedades do solo, como coesão, ângulo de atrito, e módulo de resiliência. Alguns modelos comuns em geotecnia são o modelo elástico-linear, o modelo de Mohr-Coulomb e modelos mais avançados como o modelo de Cam-Clay. Entretanto, a análise de elementos finitos é computacionalmente intensiva, especialmente para simulações em grande escala ou com muitos elementos, além de ser altamente dependente das propriedades e dos parâmetros do solo utilizados como entrada, ou seja, exige alta precisão.

2.3. Casos de deslizamentos recentes no sul do Brasil

O estado do Rio Grande do Sul encontra-se em uma posição geográfica denominada fronteira climática, em que ocorrem grandes oscilações de clima e erros frequentes nas previsões meteorológicas, devidos aos choques entre massas de ar

quente, vindas da linha do Equador, e massas de ar polar, provenientes do sul. A região tem um clima subtropical com verões quentes e úmidos. É típico do estado gaúcho que as chuvas sejam bem distribuídas ao longo do ano. Nas estações frias, as chuvas geralmente são prolongadas e de intensidade média a fraca, enquanto nas estações quentes, as chuvas são de curta duração e grande intensidade (PINHEIRO, 2012).

Foram registrados volumes históricos de precipitação no Rio Grande do Sul (RS) nos anos de 2023 e 2024, sendo setembro de 2023 o mês mais chuvoso de Porto Alegre, em 107 anos, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2024). Este padrão se estendeu até maio de 2024, com chuvas acima da média que elevaram a saturação dos solos, intensificando a ocorrência de movimentos de massa, concentrados especialmente em regiões mais vulneráveis a estes eventos, como a Serra Gaúcha.

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2024), no mês de abril de 2024 foram enviados pela Sala de Situação do CEMADEN, na Região Sul, um total de 135 alertas para os municípios monitorados, sendo 70 sobre riscos geológicos e 65 riscos hidrológicos. Já o mês de junho apresentou 40 sobre riscos geológicos e 44 riscos hidrológicos.

Durante um dos eventos meteorológicos mais severos de sua história do RS, as inundações atingiram uma grande dimensão territorial e os movimentos de massa tiveram um papel secundário ao desastre, sendo mapeadas aproximadamente 15 mil rupturas de movimento de massa em 130 municípios do estado (CEMADEN, 2024).

Em Arvorezinha/RS, por exemplo, deslizamentos planares ocorreram predominantemente em encostas declivosas de solo residual silto-argiloso sobre rocha vulcânica, como na região de Lajeado Ferreira, onde o material desprendido assoreou o rio, alterando seu curso e removendo parte da mata ciliar. Esses processos evidenciaram a instabilidade dos depósitos coluvionares na base das encostas, que frequentemente atuam como áreas-fonte de sedimentos transportados por fluxos de detritos (QUEIROZ, 2024).

Já em Marques de Souza/RS, os movimentos de massa foram registrados em encostas íngremes da Linha Tamanduá, envolvendo solos coluvionares e residuais. Um deslizamento planar nesta localidade atingiu várias casas, gerando perdas humanas e materiais significativas. Além disso, enchentes recorrentes na planície de

inundação do Arroio Tamanduá agravaram os impactos, demonstrando a vulnerabilidade das ocupações em áreas sujeitas a processos de inundação (QUEIROZ, 2024).

No município de Putinga/RS, chuvas que totalizaram 930,2 mm em maio de 2024 provocaram enxurradas de grande porte e deslizamentos planares que afetaram tanto áreas urbanas quanto rurais. Na Comunidade São Pedro, quatro deslizamentos planares de grande magnitude resultaram em um óbito e danos substanciais às edificações. Nas zonas centrais, como na Rua Getúlio Vargas, o transbordamento abrupto do Arroio Putinga causou danos em sistemas de drenagem, infraestrutura urbana e propriedades residenciais (MENDONÇA, 2024).

O município de Carlos Barbosa registrou deslizamentos em áreas do interior (Figura 8), com solos saturados resultando no deslocamento de encostas e obstruções em vias rurais. Esses deslizamentos destacaram a vulnerabilidade das áreas de encosta, afetando diretamente a infraestrutura local e dificultando o tráfego.

Figura 8 – Deslizamentos registrados em maio de 2024.



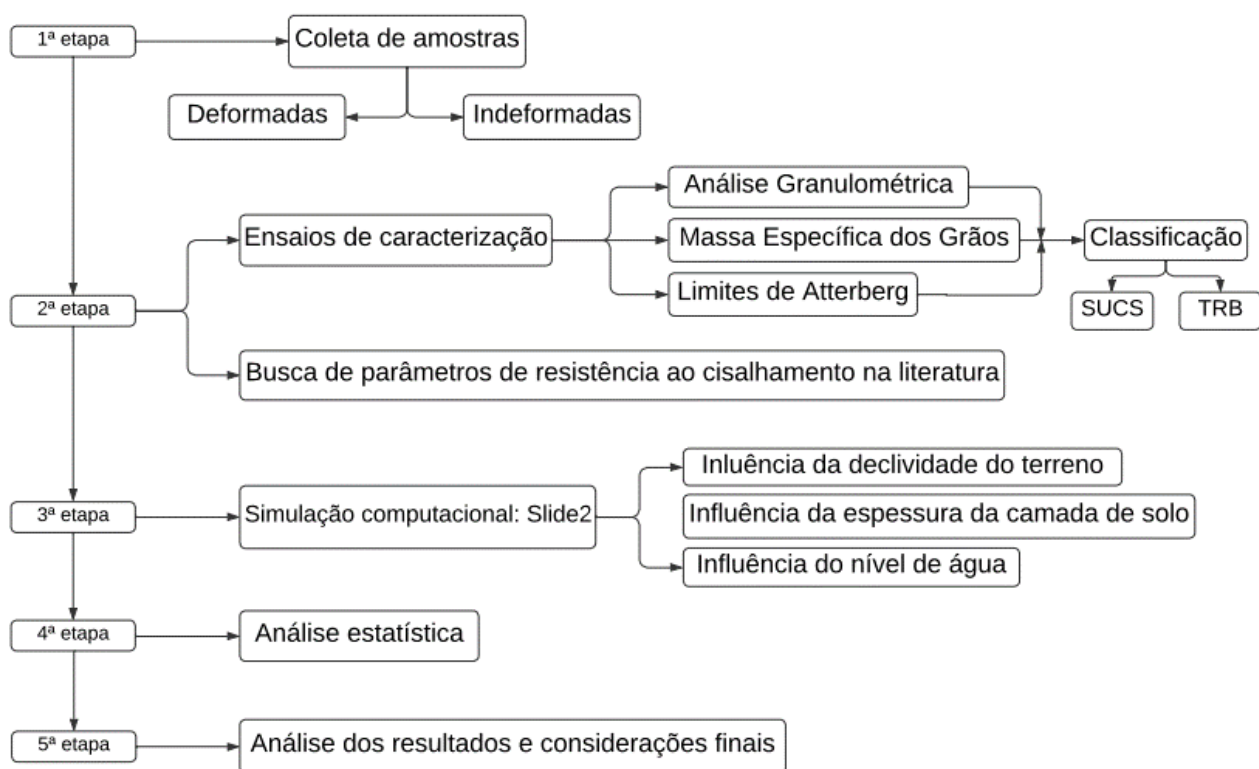
Fonte: Prefeitura de Carlos Barbosa, 2024.

Diversos autores destacam a relevância de investigações geotécnicas no estado, enfatizando a carência de análises em rodovias de alto fluxo, taludes de aterros sanitários, minas de calcário, barragem de terra, taludes rochosos, urbanos e ferroviários, entre outros. Essa negligência representa um risco significativo, não apenas para vidas humanas, mas também para a preservação ambiental. Esses autores estudaram a estabilidade com métodos como equilíbrio limite, incrementando ensaios laboratoriais como cisalhamento direto junto com simulações em *softwares* em estruturas localizadas em diversas cidades do RS, como Caçapava do Sul, Porto Alegre e Caxias do Sul (VARGAS, 2022; CIROLINI, 2020; BITENCOURT, 2021; VELOSO, 2023; AVILA, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais desta pesquisa foram organizados para avaliar a estabilidade de taludes por meio de análises práticas e modelagem computacional. Está apresentado na Figura 9 o fluxograma do programa experimental desenvolvido, detalhando cada etapa do estudo aplicado.

Figura 9 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: da Autora (2025).

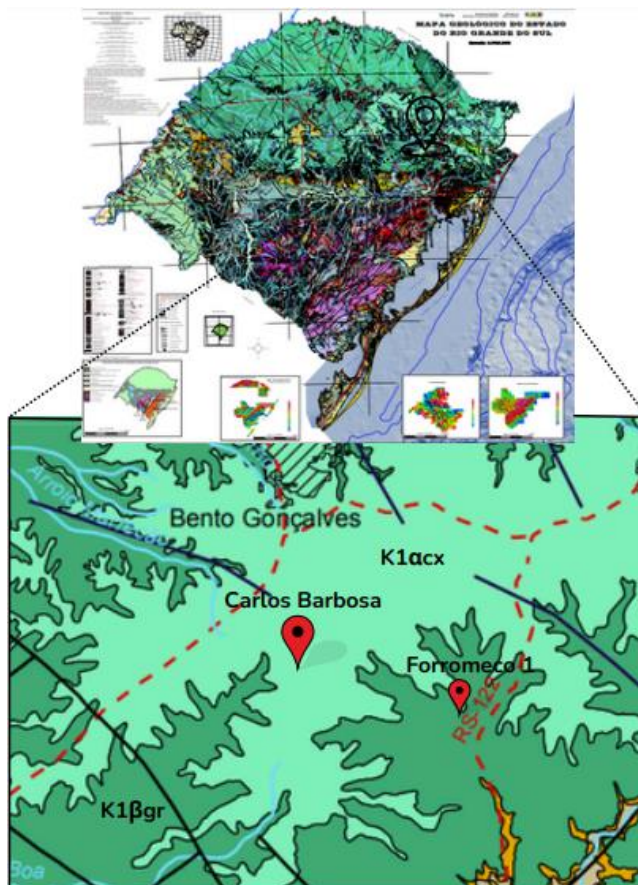
3.1. Local de estudo

Segundo Sartori (2018), a cidade de Carlos Barbosa está inserida no contexto geológico-estrutural e geomorfológico da Formação Grupo Serra Geral (FSG), a qual é caracterizada por derrames de rochas vulcânicas, incluindo basaltos, andesitos, riolitos e riolitos de natureza toleítica. Nessa sequência, intercalam-se camadas sedimentares, como os arenitos Botucatu e litarenitos, que formam a base e as porções medianas da série estratigráfica. A região possui uma composição geológica típica da Província do Paraná, formada durante o período Fanerozóico, era Mesozóica, e no Cretáceo (Figura 10).

A cidade de Carlos Barbosa se encontra em uma área de divisão de duas fácies geológicas da Formação Serra Geral, Gramado e Caxias, descritas a seguir.

- Fácies Gramado (k1βgr): derrames basálticos granulares finos a médios, melanocráticos, contendo níveis de vesículas bem desenvolvidos no topo e incipientes na base dos derrames, normalmente preenchidas por zeólitas (carbonatos e saponitas).
- Fácies Caxias (k1αcx): derrames de composição intermediária a ácida (riodacítica), mesocráticos, granulares finos a microfaneríticos, horizontes superiores com disjunção tabular regular bem desenvolvida e raras vesículas preenchidas por sílica. Centros de derrames maciços. Estruturas de fluxo laminar e dobras.

Figura 10 – Mapa geológico da região.



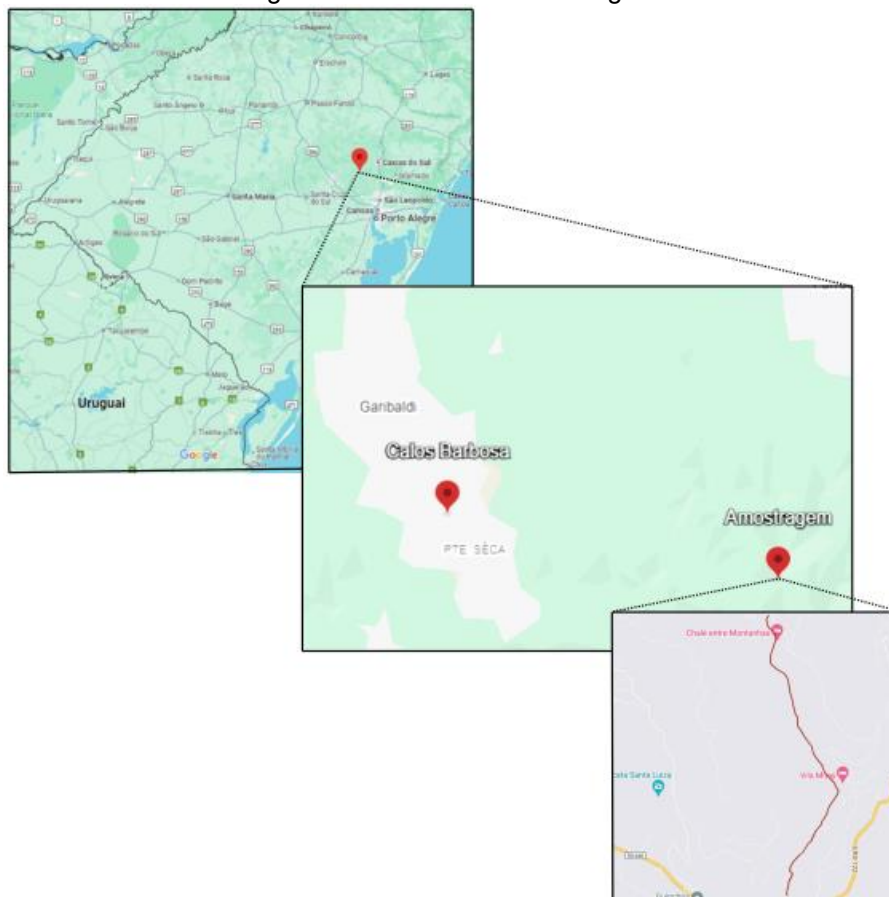
Fonte: Serviço Geológico do Brasil, CPRM.

3.2. Coleta de amostras deformadas e indeformadas

Foram selecionados pontos de amostragem no trecho de Forromeco 1, com 4,67 km de extensão, (Figura 11), em áreas previamente avaliadas como de risco

crítico devido à observação de sinais de instabilidade. O trecho possui relevo acidentado e diversos deslizamentos foram observados ao longo do seu traçado.

Figura 11 – Trecho de amostragem.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Foram obtidas tanto amostras deformadas quanto indeformada, em taludes onde solo aflorava na face, revelando indícios de instabilidade superficial, evidenciados pela deposição de pequenos volumes de terra acumulados nos sopés. Além disso, observavam-se depósitos de rochas e marcas de deslizamentos que se estendiam desde o topo dos taludes, com sinais visíveis nas árvores ao longo do declive (Figura 12).

Figura 12 – Instabilidade em taludes da região.



Fonte: da Autora (2024).

Foram selecionados três pontos para coletas deformadas (Figura 13). A amostra indeformada foi coletada no mesmo talude da amostra 1, de forma cuidadosa para preservar a estrutura natural do solo. Logo após sua retirada, a amostra indeformada foi envolvida com plástico filme, a fim de não perder a umidade natural até a realização dos ensaios, e armazenada de forma adequada a não sofrer nenhum impacto durante o transporte.

Figura 13 – Local de coleta do solo.



Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3

Fonte: da Autora (2024).

3.3. Caracterização e classificação geotécnica

A classificação do solo foi realizada com base nos sistemas SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e TRB (*Transportation Research Board*). Para isso, foram realizados ensaios específicos de caracterização. O solo foi devidamente seco ao ar e destorroado em conformidade com a NBR 6457/2024 (ABNT, 2024).

A determinação da massa específica da amostra (Tabela 1) foi realizada de acordo com a NBR 6458/2016 (ABNT, 2016b).

Tabela 1 – Massa específica dos sólidos¹.

Ms (g)	M'w (g)	M1 (g)	M2 (g)	ρ_w (g/cm³)	ρ_s (g/cm³)
54,91	478,01	692,34	659,93	0,997	2,655

Fonte: da Autora (2025).

Para definir os limites de Atterberg (Figura 14), foram realizados os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), seguindo as normas NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente (ABNT, 2016c, ABNT, 2016d).

Figura 14 – Limites de Atterberg.



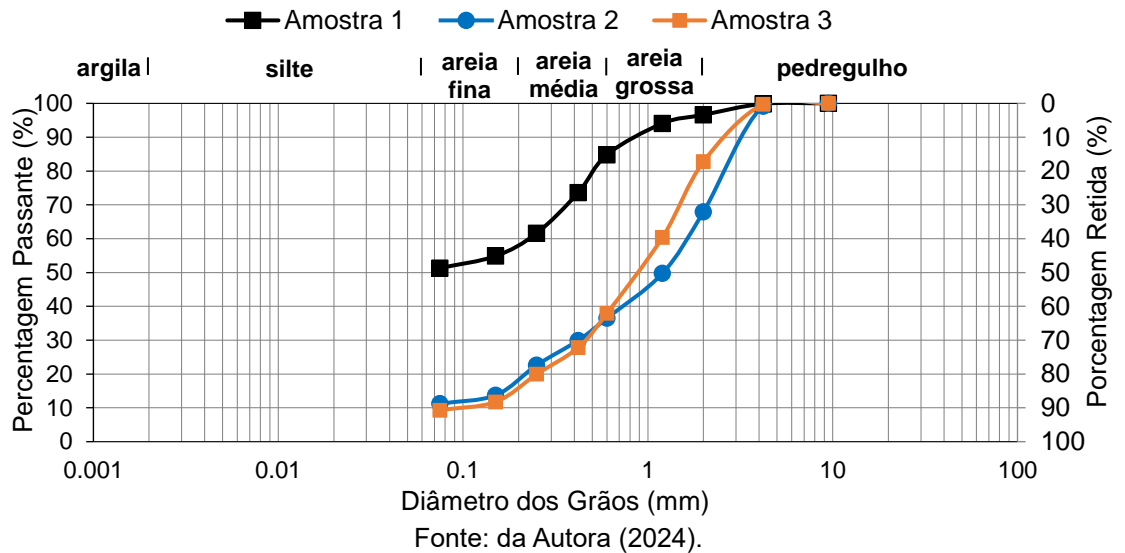
Fonte: da Autora (2024).

A análise granulométrica (Figura 15) incluiu o peneiramento grosso, seguido

¹ Ms: massa do solo seco (g); M'w: massa da cápsula + água (g); M1: massa da cápsula + solo úmido (g); M2: massa da cápsula + solo seco (g); ρ_w : massa específica da água (g/cm³); ρ_s : massa específica dos grãos do solo (g/cm³).

pelos peneiramentos finos para partículas entre 2 mm e 0,075 mm, ambos regulamentados pela NBR 7181/2016 (ABNT, 2016a). A classificação das frações de solo seguiu os critérios estabelecidos pela NBR 6502 (ABNT, 2022), que define os intervalos granulométricos para cada fração.

Figura 15 – Curvas granulométricas das amostras deformadas.



Com a amostra indeformada em sua totalidade (Figura 16a), foi determinada a massa específica natural do solo (Tabela 2). Visto a dificuldade de manuseio, foi realizada a verificação com uma amostra menor retirada do bloco (Figura 16b).

Figura 16 – Corpos de prova para ensaio de massa específica natural.



(a)



(b)

Fonte: da Autora (2024).

Tabela 2 – Massa específica natural.

Área de retirada	Massa Específica Aparente Natural (g/cm³)
Amostra 1 (grande)	1,902
Amostra 2 (pequena)	1,905
MÉDIA	1,903

Fonte: da Autora (2025).

Na Tabela 3 constam os resultados dos ensaios mencionados acima, bem como as classificações obtidas para cada amostra pelos sistemas de classificação SUCS e TRB.

Tabela 3 – Caracterização e classificações das amostras.

Área de retirada	Forromeco 1
	26,53
Umidade natural (%)	32,73
	32,12
Umidade higroscópica (%)	5,77
	6,43
	7,10
	61
Limite de Liquidez (%)	65
	58
	34
Limite de Plasticidade (%)	39
	40
Índice de Plasticidade (%) e plasticidade (DAS, 2006)	27 (Alta)
	26 (Alta)
	18 (Média)
	MH
SUCS	SW-SM
	SW-SM
	A 7-6
TRB	A 2-7
	A 2-7

Fonte: da Autora (2024).

Durante a execução do trabalho, o equipamento destinado à realização do ensaio de cisalhamento direto apresentou falhas técnicas e acabou ficando inoperante. Devido às limitações de tempo, não foi possível encaminhar as amostras para outro laboratório para a continuidade dos ensaios e obtenção dos parâmetros reais de resistência ao cisalhamento. Diante dessa situação, optou-se por estimar os valores

de coesão e ângulo de atrito com base na literatura, utilizando como suporte os dados previamente obtidos nos ensaios de caracterização, de forma a manter a coerência e viabilidade da análise de estabilidade proposta.

Segundo Silveira (2008) e Riffel (2017), os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos variam de acordo com as condições de amostragem e o tipo de ensaio realizado. No estudo, foram analisadas amostras indeformadas e os valores de coesão efetiva (c') variaram entre 7,2 e 13,9 kPa, enquanto o ângulo de atrito interno efetivo (φ') ficou em torno de 31,6°.

3.4. Simulações computacionais

O *software* Slide2, desenvolvido pela Rocscience, é um programa de estabilidade de taludes 2D e foi escolhido como ferramenta principal para este estudo, dado seu potencial de simular diferentes cenários e condições de campo com precisão e confiabilidade. Nele, é possível avaliar realizar análises determinísticas (fator de segurança) ou probabilísticas (probabilidade de falha), de superfícies de falha circulares ou não circulares em taludes de solo ou rocha. O *software* é de simples interpretação, com isso, modelos complexos podem ser criados e analisados de forma rápida e fácil. É possível analisar a estabilidade de superfícies de deslizamento usando métodos de equilíbrio limite de fatia vertical ou não vertical (por exemplo, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price). Superfícies de deslizamento individuais podem ser analisadas, ou métodos de busca podem ser aplicados para localizar a superfície de deslizamento crítica para uma dada inclinação.

O *software* também oferece suporte para a modelagem de condições complexas em taludes, como o impacto de níveis variáveis de água subterrânea e camadas de solo com diferentes propriedades, possibilitando a realização de simulações detalhadas com eficiência, tornando-o ideal para estudos geotécnicos que requerem uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a estabilidade de taludes.

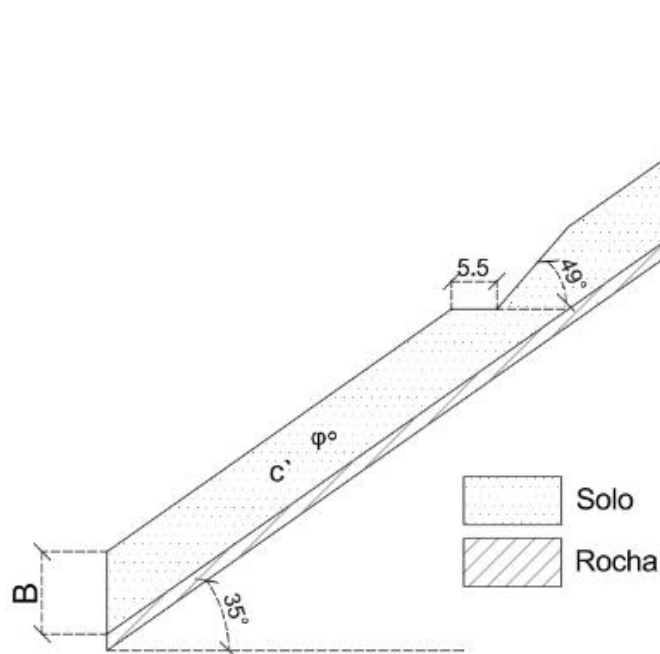
Para as simulações foi utilizado um computador com um processador Core i9 13900K com 128 GB de RAM e uma placa de vídeo GeForce RTX 4090.

A geometria do talude analisado foi estimada por meio de imagens aéreas obtidas com o uso de um drone DJI Air 2S, que possui sensor de 20 megapixels e

autonomia de voo de até 31 minutos. Além disso, foram utilizadas fotografias tiradas com celulares em campo para complementar a análise visual das condições do terreno. Com base nessas imagens, foi possível estimar a largura da via e determinação aproximada das inclinações dos taludes rodoviários e do terreno natural.

Na Figura 17 está ilustrada a geometria empregada nas análises computacionais, composta por uma camada de solo sobre rocha. São indicados os principais parâmetros considerados na modelagem: o ângulo de inclinação do talude natural ($\alpha=35^\circ$), largura da via ($A=5,5\text{m}$), profundidade da camada de solo (B) e ângulo de inclinação do talude rodoviário ($\beta=49^\circ$).

Figura 17 – Esquema representativo do modelo de talude utilizado nas simulações no Slide2.



Fonte: da Autora (2025).

A fim de avaliar o comportamento da estabilidade dos taludes em diferentes condições de campo, foram realizadas análises paramétricas no software Slide2, por meio do método de Bishop, combinando variáveis geométricas, hidráulicas e

geotécnicas, sendo estas:

- Espessura da camada de solo (B);
- Condição do nível de água (Hw),
- Coesão do solo (c) e,
- Ângulo de atrito interno (Φ).

As propriedades de resistência ao cisalhamento do solo foram analisadas em diferentes combinações, cujos intervalos de valores foram definidos com base em estudos desenvolvidos na região, os quais abordam características típicas de solos residuais locais. A variação da espessura da camada de solo foi adotada para representar diferentes profundidades potenciais, considerando não haver informações precisas sobre a profundidade até a rocha nos locais analisados. Já na simulação do nível de água foi adotada condição seca, na metade da encosta (parcialmente saturada) e até o topo do talude (saturada), tendo como objetivo representar diferentes cenários de umidade do solo, incluindo situações críticas como aquelas provocadas por períodos de chuva intensa.

Apesar da relevância da sucção na estabilidade de taludes, esse efeito não foi considerado nas simulações, devido à ausência de dados experimentais que permitissem a quantificação adequada desse parâmetro.

Essas variações nos parâmetros foram organizadas por meio de uma análise paramétrica, com o objetivo de avaliar a sensibilidade do fator de segurança frente às principais variáveis que influenciam a estabilidade de encostas em regiões compostas por solos residuais. Um resumo dos valores utilizados na análise pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de entrada Slide2.

Parâmetro	Valores		
c' (kPa)	5	10	15
Φ (°)	30	35	40
B (m)	5	7,5	10
Hw (m)	1B	0,5 B	0B

Fonte: da Autora (2025).

3.5. Análise estatística

Para aprofundar a avaliação dos resultados obtidos nas simulações computacionais, foi realizada uma análise estatística utilizando o *software* Statistica8. O programa é amplamente utilizado em pesquisas científicas e permite a aplicação de diferentes métodos estatísticos, como regressões, análises de variância e testes de hipóteses, além de possibilitar a criação de fórmulas para avaliação de conjuntos de dados.

Com o objetivo de verificar a influência relativa de cada variável no FS, foi criada uma fórmula no *software*, utilizando regressão linear, a qual incorporou os valores simulados das propriedades de resistência do solo, das condições de nível de água e da espessura da camada de solo. A partir disso, foi empregado um modelo de regressão linear, complementado por análises de variância (ANOVA), de forma a identificar quais parâmetros apresentaram maior impacto sobre o valor do FS. Essa abordagem contribuiu significativamente para a interpretação dos resultados, permitindo compreender os fatores mais críticos para a estabilidade do talude analisado.

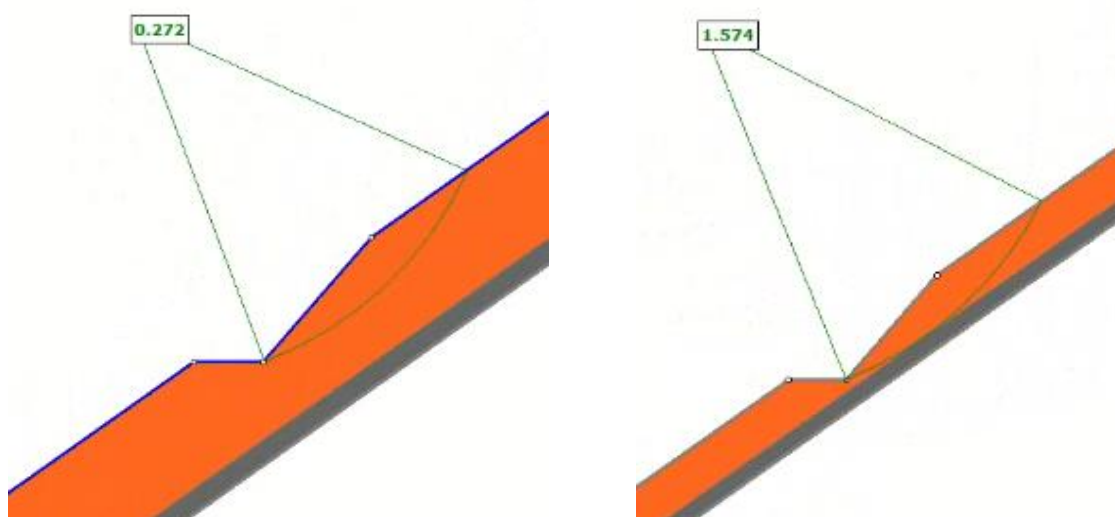
4. RESULTADOS

4.1. Análise das simulações

Foram realizadas 81 simulações, variando parâmetros geotécnicos, geométricos e hidráulicos, com o objetivo de avaliar a estabilidade de taludes sob diferentes condições representativas da região da Serra Gaúcha.

Os valores de FS obtidos variaram entre 0,272 e 1,574, Figura 18, refletindo a influência significativa das combinações entre os parâmetros analisados. Os menores fatores de segurança foram observados em cenários críticos, com solo saturado, espessura elevada da camada de solo (10 m), baixa coesão (5 kPa) e menor ângulo de atrito (30°). Nessas condições, os FS ficaram abaixo de 0,30, evidenciando elevado risco de instabilidade. Por outro lado, os maiores FS foram obtidos em cenários com solo seco, menor espessura da camada (5 m) e parâmetros resistentes mais altos ($c' = 15$ kPa e $\phi = 40^\circ$), superando valores de 1,50, considerados estáveis. Isso mostra a forte influência da presença de água e das propriedades do solo na estabilidade dos taludes.

Figura 18 – Condições críticas.



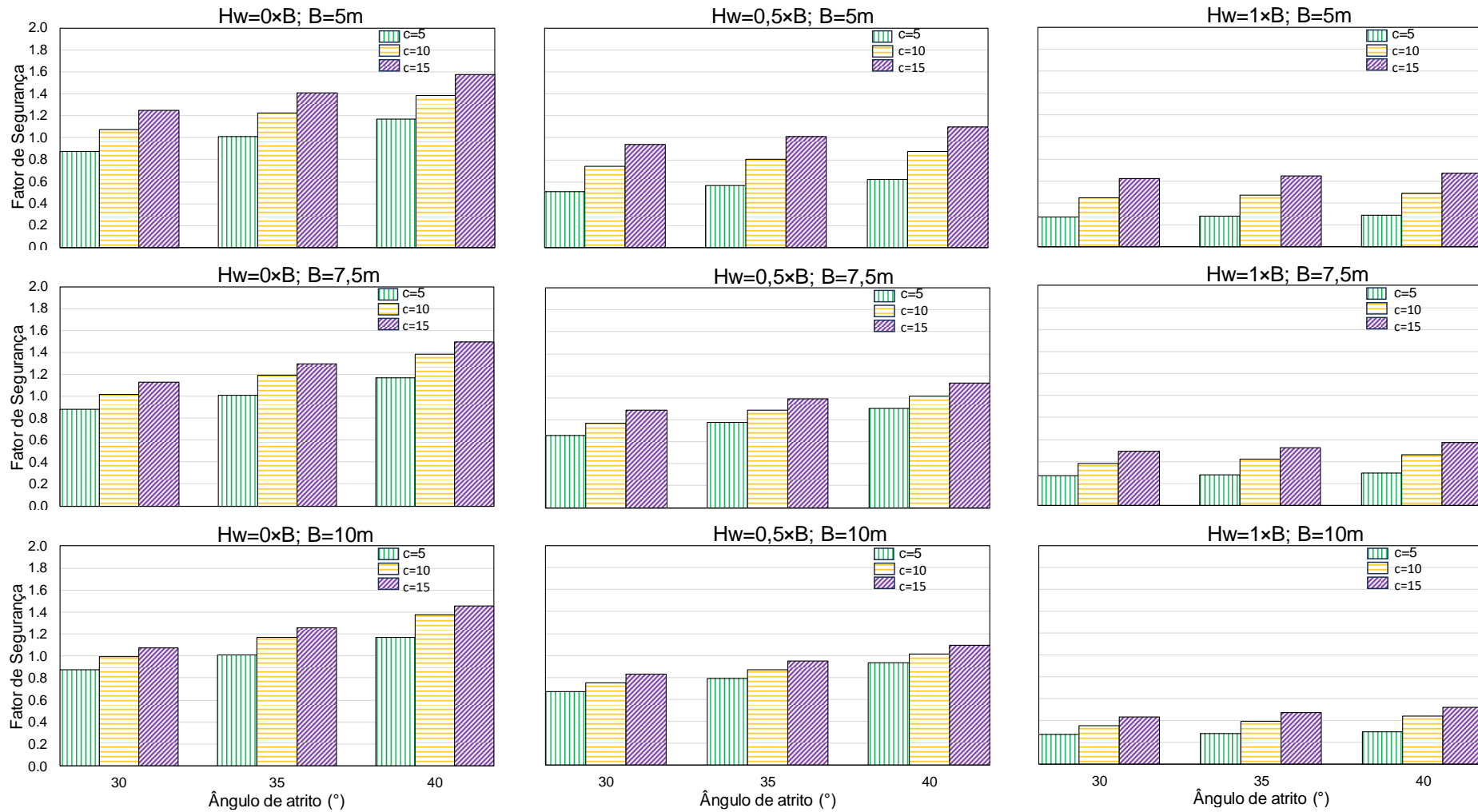
Fonte: da Autora (2025).

Além disso, foram realizadas simulações com inclinação do talude rodoviário de 49° , 55° e 60° , mantendo-se as demais condições constantes. As simulações

indicaram que o aumento da inclinação não resultou em uma redução expressiva do FS. Isso sugere que, para o modelo adotado, o impacto da inclinação do talude rodoviário é menos determinante do que fatores como o nível de água ou a resistência do solo.

Pode-se observar na Figura 19 que o aumento do ângulo de atrito, mantendo os demais parâmetros constantes, promove uma elevação do FS entre 25% e 35% para todos os casos, evidenciando seu papel relevante na resistência ao deslizamento. Da mesma forma, o acréscimo da coesão resulta em um aumento do FS entre 12% e 40%, com maiores ganhos observados em condições mais secas. A redução da espessura da camada de solo também influencia positivamente a estabilidade, elevando o FS entre 5% e 20%. Por outro lado, a presença de nível da água elevado tem impacto negativo marcante, o FS sofre uma redução que varia entre 30% e 70%, dependendo da geometria e parâmetros do solo, evidenciando que a elevação da água é o fator mais crítico para a instabilidade dos taludes simulados.

Figura 19 – Comparativo de FS conforme variações de c' , ϕ , B e Hw



Fonte: da Autora (2025).

4.2. ANOVA e regressão linear

Utilizando o software Statistica 8, foi realizada uma análise de regressão linear com o objetivo de representar o comportamento dos fatores de segurança obtidos nas simulações. Para isso, foram consideradas combinações entre as variáveis coesão, ângulo de atrito, espessura da camada de solo e nível de água, cujos dados organizados estão apresentados na da Coluna A da Tabela 5. Com base nessas variáveis, foi gerada a Equação 1, que apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97, indicando que o modelo estatístico representa com boa precisão os resultados obtidos nas simulações. Os valores estimados por regressão foram, então, comparados aos fatores de segurança calculados no software Slide2, apresentando resultados próximos e, conseqüentemente, validando a consistência da fórmula proposta.

Tabela 5 – Modelo estatístico obtido no Statistica8.

N=81	A
Intercepto	0,410211
c'	0,043170
Φ	0,004996
B	-0,066009
Hw	-0,075119
c' x Φ	0,000464
c' x B	-0,003893
c' x Hw	-0,000499
Φ x B	0,003072
Φ x Hw	-0,003468
B x Hw	0,012481

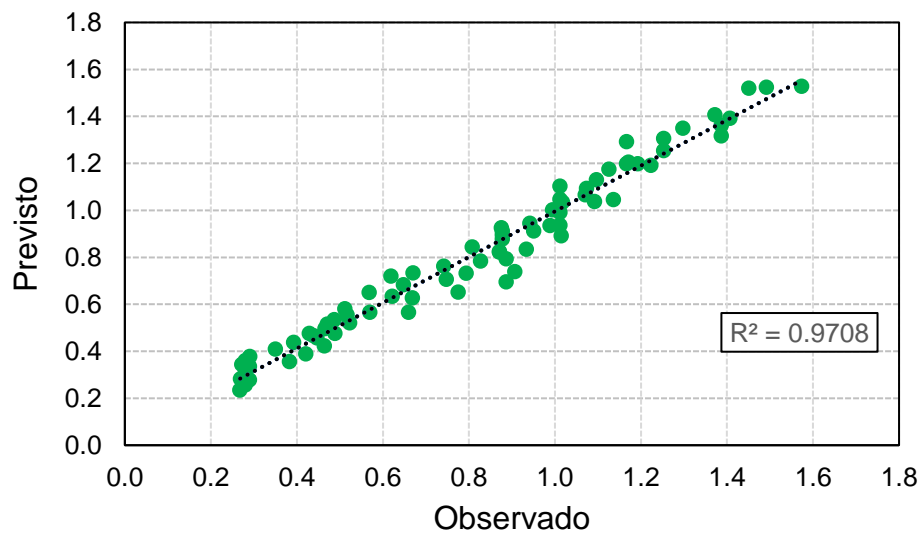
Fonte: da Autora (2025).

$$\begin{aligned} FS = & 0.043170 \times c' + 0.004996 \times \Phi - 0.066009 \times B - 0.075119 \times Hw \\ & + 0.000464 \times (c' \times \Phi) - 0.003893 \times (c' \times B) - 0.000499 \times (c' \times Hw) \\ & + 0.003172 \times (\Phi \times B) - 0.003468 \times (\Phi \times Hw) + 0.012481 \times (B \times Hw) \\ & + 0.410211 \end{aligned} \quad \text{Eq. 1}$$

Para avaliar a concordância entre os valores previstos pelo modelo estatístico e os fatores de segurança obtidos das simulações, foi elaborado o gráfico de dispersão da Figura 20. Nele, cada ponto simboliza uma combinação de parâmetros (coesão, ângulo de atrito, espessura da camada, e nível da água) comparando o FS previsto

da Equação 1 com o valor simulado. A correlação linear entre os dados se manifesta no coeficiente de determinação $R^2 = 0,9708$, mostrando que o modelo explica cerca de 97% das variações dos resultados. Essa correlação comprova a coerência da equação, confirmando que o modelo estatístico representa adequadamente o comportamento do FS sob as condições avaliadas.

Figura 20 – Dispersão dos valores previstos x realizados do FS.



Fonte: da Autora (2025).

Para a análise de influência, os valores das variáveis independentes foram normalizados, a fim de viabilizar a inserção no software Statistica8 e a aplicação do teste ANOVA. Essa etapa foi necessária para garantir a comparabilidade entre grandezas com escalas diferentes, como coesão (kPa), ângulo de atrito ($^{\circ}$), espessura da camada de solo (m) e altura do nível de água (m).

Tabela 6 – Análise ANOVA

Fator	FS param.
c'	- 0,142315
Φ	- 0,111537
B	0,082907
Hw	0,468315

Fonte: da Autora (2025).

A partir dos resultados obtidos nas simulações, foi possível observar o nível da

água como fator determinante na estabilidade do talude estudado (Tabela 6) exercendo a maior influência entre os parâmetros analisados. Isso se deve, principalmente, ao fato de que a elevação do nível da água provoca o aumento da poropressão, reduzindo a tensão efetiva do solo e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento, junto ao aumento do peso específico do solo, intensificando as forças atuantes na direção da ruptura.

Alterações significativas em outros parâmetros não causaram tantas variações quanto a observada devido a variação nas condições de umidade. Esses resultados reforçam a importância de sistemas de drenagem e controle hídrico eficientes em projetos de estabilidade de encostas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente ocorrência de instabilidades em regiões de relevo acentuado evidencia a necessidade de compreender os fatores que influenciam a estabilidade de taludes. A combinação entre a presença de solos residuais, a ação das chuvas e as características geométricas dos taludes demanda análises criteriosas, capazes de embasar medidas preventivas e corretivas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo aprofundar a investigação geotécnica na região, buscando contribuir para a gestão de riscos relacionados a escorregamentos em taludes naturais e antrópicos.

Ao fim deste trabalho, foi possível constatar que o parâmetro de maior influência na estabilidade dos taludes é o nível d'água, sendo este o principal responsável pela instabilidade em condições críticas. A elevação do lençol freático, principalmente em solos de baixa resistência, acarreta um incremento nas poropressões, aumentando o peso do maciço e, conseqüentemente, aumentando o potencial de escorregamento. A espessura da camada de solo se mostrou menos influente do que as condições hidráulicas e as propriedades geotécnicas do solo. A inclinação do talude, embora tenha um impacto importante, revela-se secundária em relação às condições hidráulicas e às características geotécnicas do solo. Destaca-se também que o aumento da espessura da camada de solo provocou a redução do FS, devido ao aumento de massa instável. Da mesma forma, a elevação do nível de água foi decisiva para a redução do FS.

Embora a falta de certos parâmetros de resistência do solo possa ter limitado a precisão das análises, os resultados obtidos fornecem uma base consistente para avaliações preliminares. A metodologia aplicada, que combinou a caracterização do solo, simulações computacionais e análise estatística, foi uma ferramenta eficaz para avaliar a estabilidade dos taludes. Essa abordagem pode auxiliar tanto no desenvolvimento de medidas preventivas quanto no planejamento de contenções, drenagem das encostas e planejamento viário. Assim, o estudo destaca a importância de considerar diferentes cenários na avaliação da estabilidade, especialmente em condições de solo saturado, contribuindo para aumentar a segurança das comunidades, das obras e da malha rodoviária, ampliando o entendimento sobre os mecanismos de instabilidade de taludes e oferecendo subsídios para políticas públicas e projetos de engenharia mais seguros e sustentáveis.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto a relevância dos resultados obtidos, destacam-se como sugestões para complementar a pesquisa apresentada:

- Considerando a recorrência de deslizamentos, é indicado expandir a análise para outros pontos críticos da Serra Geral, a fim de estabelecer um mapeamento de risco mais abrangente.
- Realizar a caracterização avançada para a verificação exata do grau de periculosidade.
- Ampliar a coleta de dados de campo para melhorar a precisão das análises e garantir maior precisão nos resultados.
- Desenvolver estudos adicionais utilizando diferentes métodos de modelagem numérica.
- Verificar a aplicabilidade da equação obtida em diferentes cenários para avaliar sua validade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP**. 360 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica dos grãos por meio do picnômetro**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5298-16: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. West Conshohocken, 2016.
- AVILA, L. O. **Vulnerabilidade das áreas sob ameaça de desastres naturais na cidade de santa maria/rs**. 2015. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BITENCOURT, G. A. **Extração automática de discontinuidades e análise de estabilidade de taludes em uma mina de calcário no município de Caçapava do Sul – RS**. 2021. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2021.
- BRASIL. Ministério das Cidades. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Organizado por Carvalho C. S. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.
- CARLOS BARBOSA. **Interior do município é o mais atingido pela enxurrada desta semana**. Disponível em: <https://www.carlosbarbosa.rs.gov.br/noticias/interior-do-municipio-e-o-mais-atingido-pela-enxurrada-desta-semana>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- CHEN, H.; LEE, C. F. **A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes**. *Geomorphology*, [S.L.], v. 51, n. 4, p. 269-288, abr. 2003.

CIROLINI, A. **Análise da estabilidade de taludes do aterro sanitário de Rosário do Sul/RS**. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 16, n. 5, 2020. ISSN 1980-0827. 52 p.

DING, J. **A new method for spatio-temporal prediction of rainfall-induced landslide**. *Science in China Series D*, [S.L.], v. 49, n. 4, p. 421-430, 25 mar. 2006.

DOURADO, K. A. **Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida**. 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2012.

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

GRIGOLON, G. B. **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O manual de deslizamento – Um guia para a compreensão de deslizamentos**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008.

KWON, Y. W.; BANG, AH.C., **The Finite Element Method Using Matlab**. United States of America, second edition, April 2000.

MENDONÇA, R. R.; QUEIROZ, L. J. S. **Avaliação técnica pós-desastre: Putinga, RS**. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2024.

NADALIN, L. F. **Análise estrutural e geotécnica voltada à estabilidade de taludes e maciços rochosos na BR-116, Rio Grande do Sul (RS)**. 2018. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

NASCIMENTO, R. S. **Confiabilidade aplicada à análise da estabilidade de taludes: um estudo de caso de uma encosta fluvial no Norte Amazônico**. 2021. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

NOLA, I. T. S. **Avaliação de dados geológico-geotécnicos prévios para elaboração de carta de eventos perigosos de movimentos de massa gravitacionais por meio de redes neurais artificiais e probabilidade**. 2015. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

OLIVEIRA, M. A. M. **Comparação entre os métodos de equilíbrio limite e elementos finitos para análise de estabilidade de taludes**. 2023. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; BRESSANI, L. A. **Análise da instabilidade de uma encosta localizada na área urbana em Santa Cruz do Sul, RS.** *Geociências (UNESP)*, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 159-174, 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUEIROZ, L. J. S.; HOELZEL, M. **Avaliação técnica pós-desastre: Marques de Souza, RS.** Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2024.

QUEIROZ, L. J. S.; MENDONÇA, R. R. **Avaliação técnica pós-desastre: Arvorezinha, RS.** Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2024.

RIBEIRO, J. R. C. **Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN.** 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

RIBEIRO JUNIOR, C. A. **Análise numérica de escorregamento em encostas.** 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

RIFFEL, E. S. **Metodologias para mapeamento de suscetibilidade a Movimentos de massa.** 2017. 88f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ROCSCIENCE. **Visão geral do Slide 2.** [Online]. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation>. Acesso em: 16 nov. 2024.

SÃO PAULO. REGINA CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ (ed.). **Mapeamento dos movimentos de massa relacionados ao desastre de abril-maio de 2024 no Estado do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br>. Acesso em: 4 nov. 2024.

SARTORI, L. L. **Caracterização e sentido de fluxo da água subterrânea de um aterro de resíduos industriais em Carlos Barbosa/RS.** 2018. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, 2018.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros.** 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVEIRA, R. M. **Comportamento geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelino (RS).** 2008. 272f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUSA, P. F. **Modelo constitutivo para a previsão da resistência ao cisalhamento não saturada usando a curva de retenção de água de solos uni e multimodais**. 2024. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

TEIXEIRA, P. C. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

TELLES, A. C. M. **Análise de estabilidade de um talude rompido na rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ**. 2015. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

USGS - Science for a Changing World. **Landslide types and processes**. US: Departamento of Interior, 2004. Acesso em: 26. nov. 2024.

VARGAS, R. R. **Análise de estabilidade de taludes rochosos na rodovia br-392, Caçapava do Sul e São Sepé, rs**. 2022. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2022.

VÁSQUEZ-NOGAL, I. **Evaluation of the Soil–Water Retention Curve of Arsenic-Contaminated Soil by the Filter Paper Method**. *Applied Sciences*, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 2610, 3 mar. 2022.

VELOSO, V. **Análise de estabilidade em taludes rochosos pelo método Q-Slope no município de Caxias do Sul/RS**. Caçapava do Sul: [s.n.], 2023. Capítulo 3.