



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS HUMANAS, CAMPUS VI
CURSO DE LICENCIATURA EM MATEMÁTICA

EMILE SANDE BATISTA SILVA

A IMPORTÂNCIA DA ESTATÍSTICA PARA SOCIEDADE: Aplicação em
Engenharia Civil

CAETITÉ
2025

EMILE SANDE BATISTA SILVA

A IMPORTÂNCIA DA ESTATÍSTICA PARA SOCIEDADE: Aplicação em
Engenharia Civil

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Matemática do Departamento de Ciências Humanas - Campus VI da Universidade do Estado da Bahia (UNEB), como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciada em Matemática.


Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos

Coorientador: Prof. MSc. Emerson Batista Silva

CAETITÉ
2025

TERMO DE ANUÊNCIA DO ORIENTADOR

Declaro para os devidos fins que li e revisei este trabalho e atesto sua qualidade como resultado final desta monografia. Confirmando que o referencial teórico apresentado é completo e suficiente para fundamentar os objetivos propostos e que a metodologia científica utilizada e os resultados finais são consistentes e com qualidade suficiente para submissão à banca examinadora final do Trabalho de Conclusão de Curso de Licenciatura em Matemática do Departamento de Ciências Humanas - Campus VI.

 Documento assinado digitalmente
MARCELO DOS SANTOS
Data: 31/03/2025 21:09:58-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo dos Santos
Orientador


EMILE SANDE BATISTA SILVA

A IMPORTÂNCIA DA ESTATÍSTICA PARA SOCIEDADE: Aplicação em Engenharia Civil

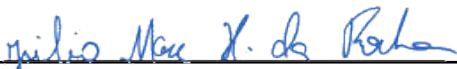
Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Matemática do Departamento de Ciências Humanas - Campus VI da Universidade do Estado da Bahia (UNEB), como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciada em Matemática.


Aprovada em: 31 de março de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 MARCELO DOS SANTOS
Data: 31/03/2025 18:59:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo dos Santos
Orientador


Prof. MSc. Júlio Max Xavier da Rocha
Examinador interno (DCH-VI/UNEB)

Documento assinado digitalmente
 DANIEL MATOS DE CARVALHO
Data: 31/03/2025 19:06:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Matos de Carvalho
Examinador externo (IFPB)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dar força e convicção para concluir esta jornada. Obrigada por me guiar com sabedoria, por me conceder perseverança diante dos desafios e por renovar minha determinação mesmo nos momentos de dificuldade.

Em seguida, gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização desta jornada. Aos meus pais, Eunice e Edson, pelo amor incondicional e apoio constante, que sempre foram a base de todas as minhas conquistas. Aos meus irmãos, Emerson e Édson Gabriel, por sempre me incentivarem nos estudos. Aos meus avós maternos, Maria Lourdes e Umbelino, pelo carinho, pelos ensinamentos e pelo apoio ao longo da minha trajetória. Aos meus padrinhos, Liandra e Enilton, por todo o incentivo e por acreditarem em mim.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo dos Santos, e ao meu coorientador, MSc. Emerson Batista Silva, pelas suas orientações, paciência e sabedoria. Suas valiosas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a Elias Júnior, que nunca mediu esforços para me apoiar. Suas palavras de incentivo foram essenciais nos momentos de dificuldade, desânimo e cansaço.

A todos vocês, meu mais sincero e profundo agradecimento. Sem o apoio, a confiança e o carinho de cada um, essa conquista não teria sido possível.

Por isso não temas, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa.

Isaías 41:10

RESUMO

Este trabalho aborda a importância da Estatística na Engenharia Civil, enfatizando sua aplicação na avaliação de riscos associados a projetos de estabilidade de taludes. A pesquisa destaca como a Estatística é uma ferramenta essencial para a análise da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, fundamental para garantir a segurança e prevenir danos. A análise de dados sobre a estabilidade de taludes, utilizando métodos estatísticos, probabilísticos, permite um planejamento mais eficaz e robusto, contribuindo para decisões mais assertivas que impactam diretamente o bem-estar da sociedade. Por meio de modelos estatísticos, é possível quantificar a probabilidade de falha e estimar com maior precisão o fator de segurança das estruturas, proporcionando uma compreensão aprofundada das incertezas e variabilidades que influenciam os projetos de Engenharia Civil. Isso se torna particularmente relevante em um cenário em que desastres relacionados à instabilidade de taludes têm consequências devastadoras, resultando em perdas humanas. Assim sendo, os resultados aqui apresentados evidenciam que a aplicação de técnicas estatísticas não apenas aprimora a compreensão dos riscos, mas também promove um futuro mais seguro e sustentável ao assegurar que as obras atendam às necessidades sociais e protejam vidas e recursos naturais. Dessarte, a estatística se revela como uma ferramenta indispensável não só apenas para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes, mas também para a promoção do bem-estar da sociedade como um todo.

Palavras-chave: Análise Probabilística; Estabilidade de Taludes; Variabilidade; Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

This paper discusses the importance of statistics in Civil Engineering, emphasizing its application in assessing risks associated with slope stability projects. The research highlights how statistics serve as an essential tool for analyzing the variability of geotechnical parameters, which is crucial for ensuring safety and preventing damage. The analysis of slope stability data using statistical and probabilistic methods enables more effective and robust planning, contributing to more accurate decision-making that directly impacts societal well-being. Through statistical models, it is possible to quantify the probability of failure and estimate the safety factor of structures with greater precision, providing a deeper understanding of the uncertainties and variabilities that influence Civil Engineering projects. This is particularly relevant in a context where disasters related to slope instability have devastating consequences, often resulting in human losses. Thus, the findings presented here demonstrate that the application of statistical techniques not only enhances risk assessment but also promotes a safer and more sustainable future by ensuring that construction projects meet societal needs while protecting lives and natural resources. Consequently, statistics emerge as an indispensable tool not only for the development of resilient infrastructure but also for the promotion of overall societal well-being.

Key-words: Probabilistic Analysis; Slope Stability; Variability; Shear Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico de distribuição, (a) normal e (b) log-normal (Fabrício, 2006). . .	18
Figura 2 – Uma massa de solo instável dividida em “ n ” fatias (Silva; Silva, 2023) .	19
Figura 3 – Histograma (Rocscience, 2025).	23
Figura 4 – Gráfico de Convergência (Rocscience, 2025).	23
Figura 5 – Gráfico de Dispersão (Rocscience, 2025).	24
Figura 6 – Gráfico Cumulativo (Rocscience, 2025).	24
Figura 7 – Modelo bidimensional de talude fictício (Silva; Silva, 2023).	26
Figura 8 – Parâmetros de entrada da análise probabilística.	27
Figura 9 – Variabilidade de Coesão da argila porosa do Distrito Federal.	29
Figura 10 – Variabilidade do Ângulo de Atrito da argila porosa do Distrito Federal.	30
Figura 11 – Variabilidade do Peso Específico da argila porosa do Distrito Federal. .	31
Figura 12 – Análise de estabilidade probabilística, aplicando o método de Monte Carlo.	33
Figura 13 – Histograma, relação Fator de Segurança vs Frequência Relativa.	34
Figura 14 – Gráfico acumulativo, relação Fator de Segurança vs Frequência Acumulada.	35
Figura 15 – Gráfico de Convergência, relação Números de Amostras vs Probabilidade de Falha.	35
Figura 16 – Curva de dispersão, relação Coesão vs Fator de Segurança.	36
Figura 17 – Histograma, relação Coesão vs Frequência Relativa.	37
Figura 18 – Curva de dispersão, relação Ângulo de Atrito vs Fator de Segurança. . .	37
Figura 19 – Histograma, relação Ângulo de Atrito vs Frequência Relativa.	38
Figura 20 – Curva de dispersão, relação Peso Específico vs Fator de Segurança. . .	38
Figura 21 – Histograma, relação Peso Específico vs Frequência Relativa.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os métodos de análises disponíveis no <i>Slide2</i>	20
Tabela 2 – Os métodos de análises disponíveis no <i>Slide2</i> , com as considerações sobre as fatias, superfícies de ruptura e condições de equilíbrio	20
Tabela 3 – Coordenadas do modelo bidimensional de talude fictício	26
Tabela 4 – Medidas de tendências central e de dispersão na coesão.	28
Tabela 5 – Medidas de tendências central e de dispersão no Ângulo de Atrito.	29
Tabela 6 – Medidas de tendências central e de dispersão no Peso Específico.	30
Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos nas análises determinísticas.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo geral	12
1.2	Objetivos específicos	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	Evolução histórica da Estatística	13
2.2	Conceitos básicos de Estatística e Probabilidade	15
2.3	Estabilidade de talude	18
2.3.1	<i>Análise determinística versus análise probabilística</i>	20
2.3.2	<i>Métodos de amostragem</i>	21
2.3.3	<i>Gráficos de probabilidade</i>	22
3	METODOLOGIA	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1	Análise estatística	28
4.2	Análise determinística	31
4.3	Análise probabilística	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A estatística desempenha um papel essencial em diversas áreas do conhecimento, tornando-se indispensável em setores como economia, saúde, ciências sociais, engenharia, entre outros. Na prática de engenharia aplica-se simplificações para solucionar problemas, como por exemplos: barragens, túneis, pavimentos rodoviários e ferroviários, fundações e contenções. No entanto, esses problemas são repletos de variáveis relacionadas com comportamento de tensão e deformação, dentre estes destaca-se variação do teor de umidade do solo (sucção), fluxo d'água, e a variação da rigidez e resistência ao cisalhamento do solo em profundidade. Assim, utiliza-se de métodos de cálculos analíticos, aplicando resultados de ensaios normalmente de material coletado em uma única profundidade para representar o perfil de solo, com isso é realizado um programa experimental, o qual deste são determinados parâmetros médios, que teoricamente vão representar o comportamento do solo.

Em estabilidade de talude os cálculos analíticos são realizados por meio do método do Equilíbrio limite, podendo ser realizadas análises determinísticas, como o supracitado com valores médios dos parâmetros do solo, essas análises não são capazes de suprir todas as incertezas relacionadas com a variação destes parâmetros. Logo, pode-se sub ou superestimar o fator de segurança do talude. Portanto, é essencial a aplicação da Estatística e probabilidade em análises de estabilidade de taludes, pois com isso é permissível determinar a probabilidade de falha do talude, levando em conta a sensibilidade da variação dos parâmetros para o fator de segurança.

Promovendo assim uma análise mais eficaz, se aproximando assim do entendimento do comportamento real do talude. A importância da Estatística na Engenharia Civil se torna ainda mais evidente quando consideramos o impacto direto dessa área na sociedade. Desastres como o rompimento das barragens de Mariana e Brumadinho ressaltam a necessidade de um monitoramento rigoroso e da consideração das incertezas nos cálculos de segurança. Tais tragédias resultaram em danos ambientais e sociais significativos, além da perda de vidas humanas, evidenciando a falha em prever e controlar riscos. Assim, a Estatística se torna uma ferramenta essencial para aprimorar estudos de risco, garantindo maior segurança e eficiência nas obras de engenharia.

Neste contexto, este trabalho tem como finalidade demonstrar a importância da Estatística, e da probabilidade nas análises de estabilidade de taludes para sociedade. Para isso, é essencial compreender tanto as medidas estatísticas (medidas centrais e de dispersão), quanto de métodos de amostragem probabilísticas. Esses conceitos são primordiais para elaboração e interpretação das análises probabilísticas de estabilidade de talude. Em vista disso, organizamos este estudo em 5 seções: introdução, revisão bibliográfica, metodologia,

resultados obtidos e a discussão dos mesmos, culminando com as considerações finais.

1.1 Objetivo geral

Demonstrar a importância de estudos estatísticos para sociedade, utilizando uma aplicação na área de Engenharia Civil.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar levantamento bibliográfico acerca da Estatística, e estabilidade de talude;
- Obter parâmetros físicos e de resistência do solo do Distrito Federal presente na literatura;
- Realizar uma análise exploratória de dados utilizando os conceitos de estatística descritiva;
- Elaborar um modelo bidimensional de talude fictício, para a realização de análises determinísticas e probabilísticas;
- Analisar gráficos provindos da análise probabilística;
- Discutir a relevância da Estatística para Engenharia Civil e conseqüentemente para a sociedade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos necessários para entendimento e realização deste estudo.

2.1 Evolução histórica da Estatística

A Estatística, assim como os números e os próprios seres humanos, tem uma trajetória histórica, como afirma Crespo (2002, p.12), “Todas as ciências têm duas raízes na história do homem”. Para compreendermos melhor como esse campo de estudo se aplica, é essencial conhecermos sua evolução e suas contribuições ao longo dos séculos.

Os princípios da Estatística estão presentes nas pesquisas científicas desde a antiguidade, ainda que de maneira rudimentar e imprecisa. Desde tempos antigos, a humanidade se deparava com desafios que intervieram na busca por soluções adequadas para resolver seus problemas. Isso levou a uma busca contínua por métodos que facilitassem suas atividades, resultando no aprimoramento e na modernização de técnicas para torná-las mais eficientes.

Há indícios de que já eram utilizados estatística a 5.000 anos a.C, com contagem dos prisioneiros, registros egípcios de guerra, além disso, por volta de 3.000 anos a.C. já se faziam censos em países, como na Babilônia, China e Egito ¹. Um exemplo de aplicação da Estatística pode ser visto no capítulo do livro de Números da Bíblia, quando Moisés recebeu instruções de Deus para realizar um censo, contabilizando os homens aptos para guerrear.

Tomai a soma de toda Congregação dos filhos de Israel, segundo as suas gerações, segundo a casa de seus pais, conforme o número dos nomes de todo varão, cabeça por cabeça; da idade de vinte anos para cima, todos os que saem à guerra em Israel, a estes contareis segundo os seus exércitos, tu e Arão (Bíblia, 1995, NÚMEROS, 1:1-3).

Além disso, a própria Bíblia contém relatos que indicam a existência de registros. Um exemplo que está no novo testamento, é o nascimento de Jesus Cristo, quando José e Maria foram à cidade de Belém para se recensearem. O imperador da época, César Augusto, havia decretado que um censo fosse realizado para contabilizar todos os habitantes, e cada pessoa deveria ser registrada em sua cidade de origem.

Naquele tempo o imperador César Augusto mandou uma ordem para todos os povos do Império. Todas as pessoas deviam se registrar a fim de ser feita uma contagem da população. Quando foi feito esse primeiro recenseamento, Cirênio era governador da Síria. Então todos foram se registrar, cada um na sua própria cidade. Por isso José foi de Nazaré, na Galiléia, para a região da Judéia, a uma cidade chamada Belém, onde

¹ A palavra CENSO é derivada da palavra CENSERE, que em Latim significa TAXAR.

tinha nascido o rei Davi. José foi registrar-se lá porque era descendente de Davi. Levou consigo Maria, com quem tinha casamento contratado. Ela estava grávida, e aconteceu que, enquanto se achavam em Belém, chegou o tempo de a criança nascer. Então Maria deu à luz o seu primeiro filho. Enrolou o menino em panos e o deitou numa manjedoura, pois não havia lugar para eles na pensão (Bíblia, 1995, LUCAS, 2:1-7).

De acordo com Costa (2011), desde a Antiguidade, diversos povos já registravam dados sobre habitantes, nascimentos e óbitos de humanos ou animais, também estimavam riquezas individuais e coletivas, distribuía terras de forma equitativa, coletavam dados sobre colheitas, cobravam impostos e realizavam levantamentos quantitativos. Na Idade Média, os dados coletados eram geralmente organizados com finalidades tributárias ou bélicas. Já no século XVI, surgiram as primeiras análises sistemáticas, como batizados, casamentos, funerais, originando as primeiras tábuas, tabelas e o cálculo de probabilidades. Nessa época, era comum fazer inquéritos sobre os quantitativos anuais de produtos como o trigo, a fim de calcular impostos. Até o início do século XVII, a Estatística tinha um uso restrito a assuntos de Estado e era basicamente uma técnica de contagem que traduzia numericamente fatos ou fenômenos observados.

No entanto, ainda no século XVII, na Inglaterra, iniciou-se uma nova etapa no desenvolvimento da Estatística, agora panorâmica para a análise das características observadas, marcando o início da fase da Estatística analítica. John Graunt, entre 1620 e 1674, foi o pioneiro ao publicar um trabalho estatístico que abordou a mortalidade dos habitantes de Londres. Esse estudo foi crucial para o surgimento das primeiras tábuas de mortalidade e para a elaboração de variação sobre a expectativa de vida, dando origem à demografia.

No século XVIII o estudo de tais fatos foi adquirindo, aos poucos, feição verdadeiramente científica, dando origem do termo Estatística. Godofredo Achenwall (1719 – 1772), batizou a nova ciência (ou método) com o nome de Estatística, determinando o seu objetivo e suas relações com as ciências. Há quem diga que o seu autor foi Godofredo Achenwall (1719 – 1772), que usou pela primeira vez o termo estatístico (*statistik*, do grego *statizein*). Outros também afirmam que tem origem na palavra estado, do latim status, pelo aproveitamento que dela tiravam os políticos e o Estado. Contudo, muito antes do termo Estatística, os romanos asseguravam o recenseamento dos cidadãos, e a Bíblia chega até a testemunhar um desses recenseamentos.

Ao longo dos séculos XVIII e XIX – a Estatística desenvolveu-se muito, associada ao cálculo das probabilidades que haviam se desenvolvido e à realização de trabalhos de pesquisa científica. Mais tarde, a Estatística deixou de ser mera técnica de contagem de fenômenos para se transformar numa poderosa “alfaia” científica a serviço dos diferentes ramos do saber. Surge então a fase da Estatística Aplicada. É com essas características que a Estatística é hoje reconhecida, pois informações numéricas são necessárias para cidadãos

e organizações de qualquer natureza e de qualquer parte do mundo globalizado. Portanto, é uma ciência moderna, imprescindível para entender aspectos e problemas em todas as áreas do conhecimento.

Conforme Inesul (2007), a Estatística começou a ganhar destaque nas diversas áreas do conhecimento somente no século XIX. No entanto, foi a partir do século XX que seu uso contínuo se consolidou, tornando-se essencial em diversos setores da sociedade, o que propiciou uma evolução significativa. Com o tempo, a Estatística se adaptou, desenvolvendo novas metodologias e indicadores cada vez mais sofisticados para atender às novas demandas da sociedade. O avanço da tecnologia, com o aprimoramento de equipamentos modernos e *softwares* avançados, junto à capacitação técnica dos profissionais, foi fundamental para esse processo.

Essa crescente importância da Estatística levou à fundação, no Brasil, em 1938, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Hoje, o IBGE é considerado o órgão de maior representatividade do país, sendo responsável por realizar pesquisas e estudos baseados em dados coletados, como censos populacionais, levantamentos sobre a economia, saúde e educação, entre outros. A Estatística desempenha, portanto, um papel vital em múltiplas áreas, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões informadas, avaliação de políticas e otimização de processos em áreas como saúde, economia e ciências sociais, agronegócio, engenharia, entre outros.

No campo da engenharia, especificamente na estabilidade no talude, seu papel é crucial. A Estatística contribui significativamente para a segurança e eficácia das obras, permitindo prever falhas, aprimorar o controle de qualidade e garantir a integridade das construções. No setor da engenharia civil, o uso eficiente da Estatística não só melhora a qualidade das obras, mas também assegura a proteção da vida humana e contribui para o desenvolvimento sustentável das infraestruturas urbanas. Através da aplicação de métodos estatísticos, é possível identificar potenciais riscos, otimizar recursos e assegurar a durabilidade das estruturas, tornando a Estatística uma aliada imprescindível no processo de construção e gestão de grandes projetos.

2.2 Conceitos básicos de Estatística e Probabilidade

De acordo com Portella *et al.* (2015), a Estatística é a ciência responsável pela coleta, processamento e organização de dados, funcionando como uma ferramenta crucial na solução de problemas. Ela facilita a interpretação dos dados e ajuda a estabelecer conclusões confiáveis sobre fenômenos investigados. Além disso, a Estatística se concentra na análise de dados informativos, proporcionando uma base sólida para decisões fundamentadas.

A Estatística se divide em duas áreas: Estatística Descritiva, responsável por organizar, apresentar e resumir os dados de forma clara por meio de tabelas, gráficos

e medidas estatísticas, e Estatística Inferencial que usa métodos analíticos para fazer previsões e tirar conclusões sobre todo um grupo (chamado população) com base em uma amostra. A inferência estatística aplica a teoria das probabilidades para estender resultados de uma amostra para toda a população.

Após a coleta e apresentação dos dados, as medidas de tendência central auxiliam no momento da interpretação, pois resumem as principais características do conjunto de dados. Ressalta-se as principais medidas de tendência central: média aritmética, mediana e moda. Já as medidas de dispersão analisam a distância dos valores de um conjunto até a sua média, isto é, observam a variabilidade ou dispersão dos valores observados. Ressalta-se as principais medidas de dispersão: desvio padrão e variância.

A média aritmética é o tipo de tendência central mais utilizado, embora existam diferentes tipos de média. Essa é determinada pela soma de todos os elementos do conjunto dividida pela quantidade de elementos deste. Essa definição pode ser representada por \bar{x} (lido como “x barra”), no caso de média amostral, ou pela letra grega minúscula μ (pronunciada “mi”), no caso de média populacional, (Triola, 2011). Essa definição pode ser expressa pela Equação (2.1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.1)$$

onde \bar{x} – Média aritmética; x_i – Variável e n – Número de variáveis.

A mediana de um conjunto de dados é a medida de centro que corresponde ao valor situado no meio de uma sequência ordenada de dados, organizados em ordem crescente (ou decrescente) de magnitude. Em situações em que o conjunto de dados possui um número par de elementos, a mediana é obtida calculando a média dos dois valores centrais. Geralmente, quando uma série de valores contém um valor extremo (um valor significativamente acima ou abaixo dos demais na lista), a média não se mostra como uma medida representativa adequada. Nesse contexto, a mediana é uma medida de tendência central mais adequada (Downing; Clark, 2011).

A moda é o valor que aparece com mais frequência, ou seja, que ocorre com a maior frequência em um conjunto de dados, vale ressaltar, que a moda pode não ser única (Spiegel, 1993). Assim como a mediana, a moda também não é afetada por valores extremos, porém é empregada somente para fins descritivos devido ser à sua maior variabilidade.

No entanto, a média aritmética é afetada por valores extremos, uma forma de avaliar esse impacto é mediante o desvio padrão que consiste na medida da variação dos valores em torno da média de um conjunto de valores amostrais. Isto é, uma espécie de

desvio médio dos valores em relação à média (Triola, 2011). É expresso pela Equação (2.2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (2.2)$$

onde s – Desvio padrão; x – Variável; \bar{x} – Média aritmética e n – Quantidade de variáveis.

A variância é uma medida de dispersão que demonstra a distância de cada dado até o valor central (média aritmética), ou seja, é igual à soma dos quadrados dos desvios em relação à média. Quanto menor for a variância, mais próximo serão os valores relacionados a média. Logo, quanto maior for essa medida, os valores estarão mais distantes da média (Moreira; Santos; Moreira, 2021). Essa medida pode ser representada pela Equação (2.3).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (2.3)$$

Probabilidade é um conceito empregado para quando existe mais de uma possibilidade de um evento acontecer dentro de um conjunto de eventos alternativos, isso significa que simplesmente determina qual é a chance de algo acontecer (Alfredo; Wilson, 1975). Para encontrar a probabilidade de ocorrer um determinado resultado, utiliza-se a expressão:

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(S)}, \quad (2.4)$$

onde $P(A)$ – Probabilidade de ocorrência de um evento A ; $n(A)$ – Número de elementos do evento A e $n(S)$ – Número de elementos do espaço amostral.

Em teoria da probabilidade, uma distribuição de probabilidade descreve o comportamento aleatório de um fenômeno dependente do acaso. Para descrever essa distribuição de probabilidade existem na literatura vários tipos de distribuições estatísticas: normal, log-normal, binomial, geométrica, Poisson, gama, hiperbólica, exponencial e outras. Particularmente, neste trabalho, são utilizadas as distribuições normal e log-normal.

A distribuição normal é uma das mais utilizadas em probabilidade, caracterizada por uma curva simétrica em formato de sino (Rezende, 2013), conforme pode ser observado na Figura 1a. A função de distribuição normal é expressa pela Equação (2.5).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.5)$$

onde σ – Desvio padrão; x – Variável aleatória associada tal que $-\infty < x < \infty$, e μ – Média da distribuição.

A Distribuição log-normal ocorre, na prática, quando o logaritmo de uma variável aleatória segue uma distribuição normal com parâmetros μ e σ (Figura 1b). Esta é utilizada em situações onde a variável de interesse apresenta assimetria à esquerda ou para variáveis

em relação a μ que não podem fisicamente assumir valores negativos, sendo restrita a valores estritamente positivos (Rezende, 2013). A função de probabilidade log-normal é dada pela Equação (2.6).

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.6)$$

onde σ – Desvio padrão, restrito a $\sigma > 0$; x – Variável aleatória, restrita a $x > 0$, e μ – Média.

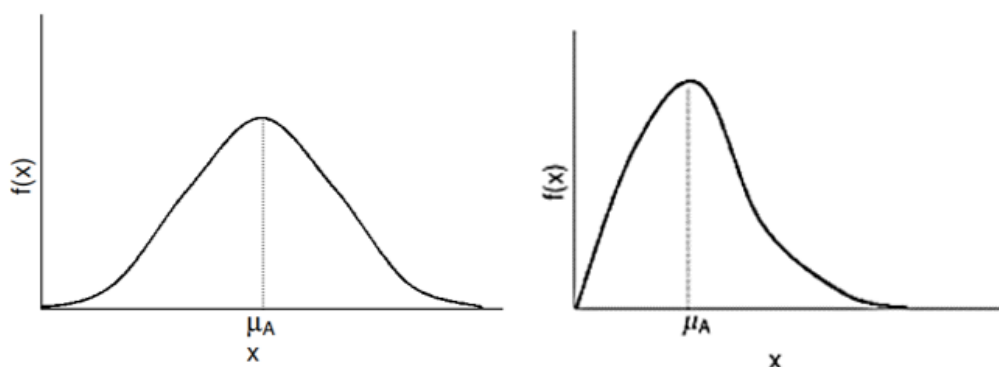


Figura 1 – Gráfico de distribuição, (a) normal e (b) log-normal (Fabrício, 2006).

2.3 Estabilidade de talude

Talude é o termo utilizado para qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser classificado como natural (encosta) quando se refere a inclinações ou superfícies inclinadas que se formam espontaneamente em massas de solo ou rocha, como, por exemplo, erosão, intemperismo ou movimentos geodinâmicos. Por outro lado, taludes também podem ser construídos pela ação humana, como, por exemplo, os aterros, cortes e escavações (Gerscovich, 2016).

A estimativa do grau de estabilidade de um talude é necessária quando se envolve obras como estradas, fundações, túneis, escavações, dentre outros, pois a segurança durante as operações requer conhecimento se um determinado talude está estável ou se permanecerá estável após a execução de uma determinada geometria planejada, para que se possa evitar uma possível ruptura. Entre as diversas superfícies potenciais de ruptura, aquela que apresenta o menor fator de segurança é designada como superfície crítica, já em situações que ocorreu um escorregamento, essa superfície crítica é então denominada como superfície de ruptura (Silva, 2015).

Desse modo, a escolha do método de análise mais adequada é um fator crucial a ser considerado, estando diretamente relacionada às condições de contorno do local, incluindo elementos como topografia, estratigrafia e condições de fluxo. A compreensão desses elementos é fundamental para uma análise precisa da estabilidade do talude.

Assim, a determinação da estabilidade do talude é comumente abordada por meio de métodos analíticos, que utilizam fundamentos da teoria do equilíbrio-limite que articula a estabilidade de um talude por meio de um Fator de Segurança (FS) ou a Probabilidade de Ruptura (PF) e nos modelos numéricos de tensão-deformação, que são baseados nas relações existentes entre as tensões atuantes e as deformações sofrida pelos materiais que compõem o talude (Silva, 2015).

Conforme Abramson *et al.* (2001), os métodos de equilíbrio limite utilizados na análise de estabilidade de taludes para superfícies de ruptura empregam uma abordagem de dividir a superfície potencial de ruptura em pequenas fatias (Figura 2). A aplicação do método das fatias consiste em estabelecer uma superfície de deslizamento arbitrariamente e calcular o equilíbrio da massa de solo. Isso é feito através da utilização das equações estáticas, dividindo o solo acima da linha de ruptura em fatias com faces verticais.

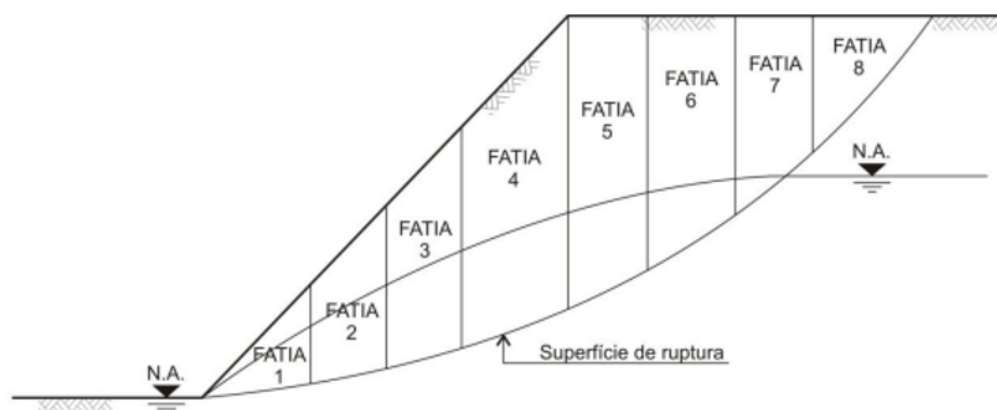


Figura 2 – Uma massa de solo instável dividida em “ n ” fatias (Silva; Silva, 2023)

Ou seja, o método de equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa de solo, considerando que pode ser delimitada por uma superfície de ruptura de forma circular, poligonal ou complexa (qualquer outra geometria). Nesse método, assume que o Fator de Segurança (FS) é admitido constante em toda a superfície, ou seja, todos os elementos ao longo da superfície de ruptura atingem simultaneamente a resistência ao cisalhamento. A análise do equilíbrio de forças é conduzida examinando cada fatia individualmente. Quanto ao equilíbrio de momentos, ele é determinado comparando o somatório dos momentos estabilizantes e instabilizantes, e a tensão cisalhante mobilizada é uma das incógnitas do problema (Gerscovich, 2016).

Em situações envolvendo superfícies aproximadamente circulares ou complexas, a recomendação é realizar uma análise por meio do método das fatias, utilizando softwares computacionais, como por exemplo, o *Slide2* da *Rocscience*. O *Slide2* consiste em um programa de estabilidade de talude de equilíbrio limite bidimensional (2D) o qual avalia o FS e, ou PF, de superfícies de ruptura circulares ou não circulares em taludes de solo e, ou

rocha. As análises de estabilidade utilizam métodos de equilíbrio limite de fatia vertical ou não vertical. As Tabelas 1 e 2 fornecem uma visão abrangente dos métodos de análise disponíveis no *Slide2*, apresentando considerações específicas sobre fatias, superfícies de ruptura e condições de equilíbrio, conforme descrito por Silva e Silva (2023).

Tabela 1 – Os métodos de análises disponíveis no *Slide2*.

Métodos de análises do <i>Slide2</i>	
Vertical <i>Slices</i>	<i>Non-Vertical Slices</i>
<i>Bishop simplified</i>	
<i>Corps of Engineers #1</i>	
<i>Corps of Engineers #2</i>	
<i>GLE/Morgenstern Price</i>	
<i>Janbu simplified</i>	
<i>Janbu corrected</i>	<i>Sarma</i>
<i>Lowe-Karafiath</i>	
<i>Fellenius</i>	
<i>Spencer</i>	
<i>Sarma</i>	

Fonte: (Silva; Silva, 2023).

Tabela 2 – Os métodos de análises disponíveis no *Slide2*, com as considerações sobre as fatias, superfícies de ruptura e condições de equilíbrio

Métodos	Superfície de ruptura	Condições de equilíbrio
<i>Bishop simplified</i>	Circular	Forças verticais e Momentos
<i>Corps of Engineers #1</i>	Qualquer	Forças
<i>Corps of Engineers #2</i>	Qualquer	Forças
<i>GLE/Morgenstern Price</i>	Qualquer	Forças e momentos
<i>Janbu simplified</i>	Qualquer	Forças
<i>Janbu corrected</i>	Qualquer	Forças e momentos
<i>Lowe-Karafiath</i>	Qualquer	Forças
<i>Fellenius</i>	Circular	Momentos
<i>Spencer</i>	Qualquer	Forças e momentos
<i>Sarma</i>	Qualquer	Forças e momentos

Fonte: (Silva; Silva, 2023).

2.3.1 *Análise determinística versus análise probabilística*

As análises determinísticas de estabilidade de taludes são baseadas em métodos de equilíbrio limite, podendo ser descrita como uma análise quantitativa expressa sob a forma de um coeficiente ou FS. Uma forma de obtenção destes valores é a partir de ensaios realizados em campo e, ou laboratório que se utiliza uma média dos parâmetros de entrada dos resultados obtidos, considerando estes valores como constantes, sem considerar a variabilidade espacial das características do material. Porém, esse tipo de análise pode apresentar incertezas nos parâmetros utilizados devido à variabilidade existente.

Nesse contexto, o FS estimado não pode quantificar a probabilidade de ruptura ou o nível de risco associado a um projeto, o que contradiz a teoria de que o erro estimado tende a ser igual a zero. Além disso, pode-se realizar uma análise de sensibilidade, o qual alguns parâmetros são variados dentro da sua faixa de valores, e observa-se qual a sua influência no resultado do FS, mas é importante ressaltar que ela não leva em consideração a frequência de ocorrência dos dados levantados (Silva, 2015).

Já os métodos probabilísticos quantificam estas incertezas das variáveis de entrada, pois possibilitam a avaliação da distribuição de probabilidade de uma variável dependente com base no conhecimento das diversas distribuições estatísticas de cada variável independente no estudo, as quais geram a variável dependente. A utilidade dos métodos probabilísticos reside na sua capacidade de calcular a probabilidade intrínseca de falha (ou ruptura) em projetos de engenharia.

Estes métodos, aliados a informações estatísticas e a um critério de risco admissível, podem contribuir para a verificação da necessidade de adaptação de um projeto muito antes da sua implantação, atribuindo maior segurança.

2.3.2 Métodos de amostragem

O *software Slide2* da *Rocscience* permite a análise probabilística por meio de dois métodos de amostragem, sendo eles: Monte Carlo e Hipercubo Latino. Entretanto utilizaremos o Método Monte Carlo, devido à sua simplicidade de implementação e capacidade de capturar melhor a variabilidade dos parâmetros quando um grande número de simulações é realizado.

A técnica de amostragem de Monte Carlo é um método probabilístico amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento. Trata-se de uma abordagem estatística que usa valores aleatórios para obter amostras das distribuições de probabilidade dos dados de entrada (Vecci, 2018). Esse método se destaca por sua capacidade de modelar sistemas complexos e avaliar incertezas, sendo aplicado em campos como engenharia, finanças e ciências físicas.

Desenvolvida por John Von Neumann e Stanislav Ulam na década de 1940, a Simulação de Monte Carlo permite estimar resultados representativos da realidade, tornando-se uma ferramenta essencial para a análise de riscos. O método consiste na geração de um grande número de valores aleatórios para modelar as variáveis de um sistema e calcular a probabilidade de diferentes resultados. Quanto maior o número de simulações realizadas, maior a precisão dos resultados. Dessa forma, esse método oferece uma distribuição completa da variável dependente e possibilita a avaliação de riscos e probabilidades de falha.

O Método de Monte Carlo é, portanto, uma técnica de simulação estatística que

utiliza amostragem aleatória para obter resultados numéricos a partir de problemas complexos de integração e otimização. Ele possibilita modelar a incerteza e a variabilidade presente em sistemas multifatoriais, empregando um grande número de simulações para representar as realidades possíveis de um fenômeno. Segundo Robert e Casella (2010, p. 78), “a possibilidade de produzir um número quase infinito de variáveis aleatórias distribuídas de acordo com uma dada distribuição nos dá acesso ao uso de resultados frequentistas e assintóticos com muito mais facilidade”. Dada sua versatilidade, a técnica de Monte Carlo tem sido amplamente empregada para resolver problemas que envolvem alto grau de incerteza e complexidade. Seu uso se estende desde a previsão de mercado financeiro até o estudo da confiabilidade de estruturas e sistemas de engenharia, evidenciando sua relevância no suporte à tomada de decisões fundamentadas em análises quantitativas.

No campo da engenharia geotécnica, uma das utilidades da simulação de Monte Carlo é modelar o fator de segurança de taludes e calcular a probabilidade de falha, considerando variáveis como ângulo de atrito, peso específico e coesão do solo. Conforme Silva (2015), esse método permite a simulação do comportamento de variáveis aleatórias, como a resistência do solo, por meio da geração de múltiplas amostras representativas das condições de um projeto, destacando que a análise probabilística gerada pelo método ajuda a compreender a influência das incertezas nos cálculos de segurança e a estimar as probabilidades de ruptura. Para sua aplicação, é essencial conhecer os parâmetros estatísticos, como média e desvio padrão, que descrevem as variáveis envolvidas no processo.

2.3.3 Gráficos de probabilidade

Tendo em vista a realização das análises probabilísticas, essas possibilitam a elaboração de gráficos de probabilidade, para facilitar a interpretação dos resultados, dentre estes destacam-se: histograma, acumulativo, convergência e dispersão.

Histograma consiste em um tipo de gráfico utilizado na Estatística para representar a distribuição de um conjunto de dados (Figura 3). Na escala horizontal, são representadas classes de valores de dados, enquanto na escala vertical, são indicadas as frequências. As alturas das barras refletem os valores das frequências, e estas são desenhadas sem espaçamento, posicionadas adjacentes umas às outras (Triola, 2011). Esse tipo de gráfico proporciona uma visualização intuitiva da distribuição dos dados, destacando padrões, tendências e a concentração de valores em intervalos específicos.

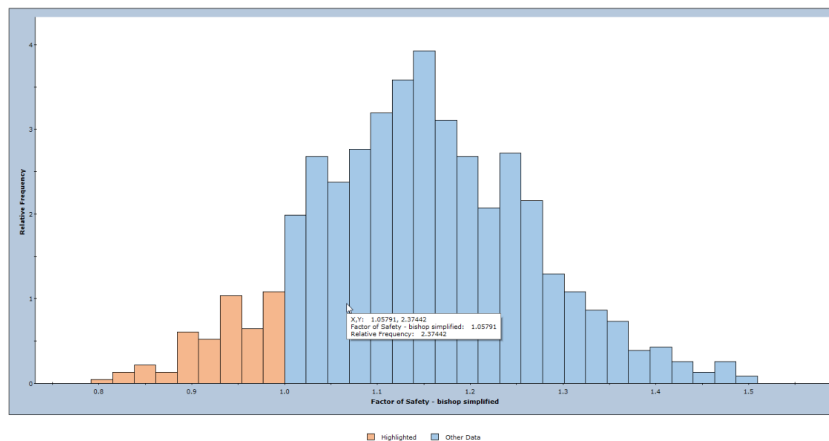


Figura 3 – Histograma (Rocscience, 2025).

O gráfico de convergência ajuda a determinar se os resultados obtidos de uma análise probabilística (PF, FS médio, etc.) convergem para uma resposta definitiva ou se são necessárias mais amostras (Rocscience, 2025). Exemplo de um gráfico de Convergência (Figura 4).

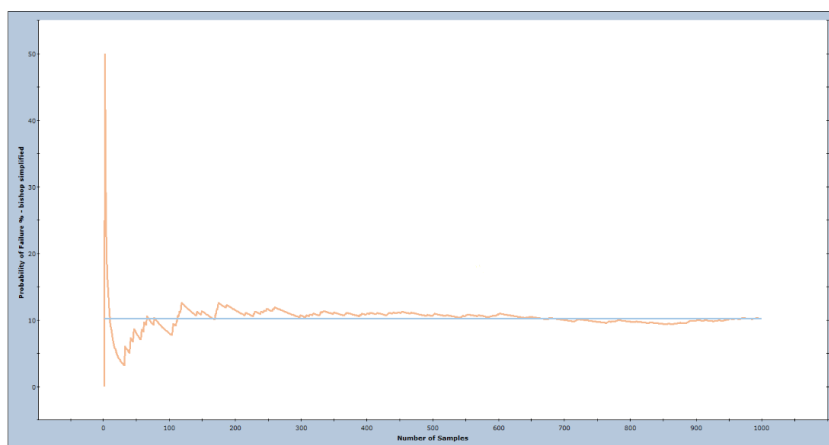


Figura 4 – Gráfico de Convergência (Rocscience, 2025).

De acordo Toledo e Ovalle (1985, p. 425), o gráfico de dispersão consiste “em um sistema de coordenadas retangulares, onde são anotados os pontos de correspondência aos pares de observações de X e de Y ”. Entretanto, permitem plotar quaisquer duas variáveis aleatórias uma contra a outra e analisar as relações entre elas usando um coeficiente de correlação. Exemplo de um gráfico de Dispersão (Figura 5).

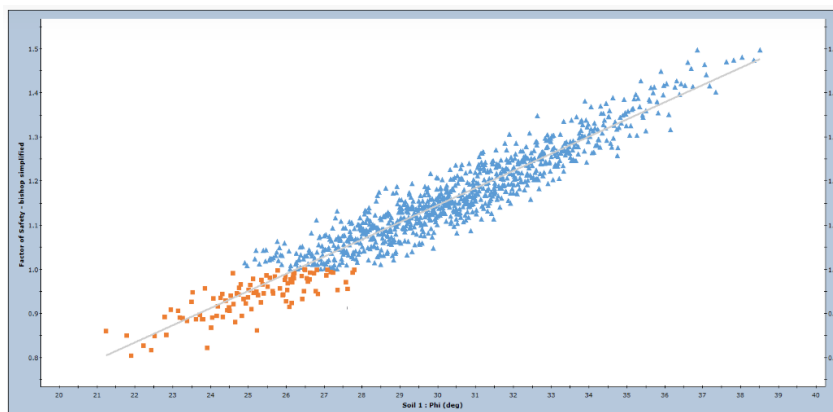


Figura 5 – Gráfico de Dispersão (Rocscience, 2025).

Um gráfico cumulativo mostra a probabilidade cumulativa de que os valores de uma variável aleatória serão menos que ou igual a um valor especificado (Rocscience, 2025). Exemplo de um gráfico cumulativo (Figura 6).

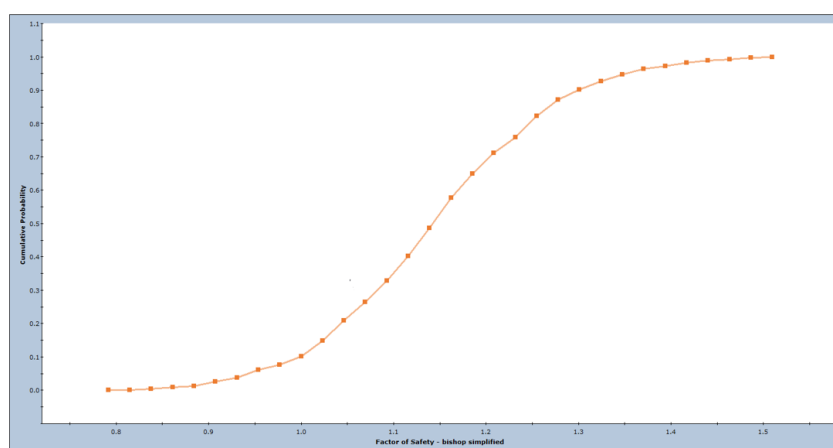


Figura 6 – Gráfico Cumulativo (Rocscience, 2025).

3 METODOLOGIA

Diante dos objetivos que propõe-se a alcançar, a metodologia adotada é quantitativa, pois se baseia na obtenção e análise de parâmetros físicos e mecânicos do solo, utilizando cálculos estatísticos, além da modelagem computacional para avaliar a estabilidade de taludes.

A metodologia quantitativa é caracterizada pelo uso de técnicas estatísticas, matemáticas e computacionais para coletar, analisar e interpretar dados numéricos. Esse tipo de abordagem busca mensurar fenômenos de forma objetiva, permitindo a identificação de padrões, relações e tendências a partir de dados concretos.

Nesse sentido, o presente estudo foi desenvolvido por meio de uma abordagem estruturada, visando demonstrar a importância da Estatística para a sociedade, com foco em sua aplicação na Engenharia Civil.

Desta forma, inicialmente elaborou-se uma revisão bibliográfica abrangente sobre a Estatística, com o objetivo de consolidar o conhecimento teórico necessário para entender os princípios e conceitos fundamentais. Nesta fase reunir informações gerais sobre Estatística e Probabilidade, além de abordar a evolução histórica da Estatística e sua relevância em diferentes áreas do conhecimento. Já no contexto da Engenharia Civil, apresentou-se os principais conceitos e métodos de análise para estabilidade de taludes, ressaltando a Estatística como uma ferramenta essencial para a avaliação e mitigação de riscos.

Em seguida, realizou-se um levantamento de dados sistematizados referentes à caracterização física e mecânica do solo do Distrito Federal disponíveis na literatura. Os estudos analisados foram: Mortari (1994), Araki (1997), Ribeiro (1999), Peixoto (1999), Cardoso (2002), Guimarães (2002), Mota (2003), Quirino (2004), Marques (2006), Silva (2006), Santos (2007), Farias (2012), Cárdenas (2014), Burgos (2016), Silva (2017), Barbosa (2019), Neto (2020), Garcia (2021), Meira (2022) e Massocco (2023). Assim, foram coletados parâmetros essenciais para as análises de estabilidade de talude (mediante método de equilíbrio limite), sendo: coesão (kPa), ângulo de atrito ($^\circ$) e peso específico (kN/m^3). Tendo como finalidade construir uma base de dados robusta para compreender as características geotécnicas dos solos da região. Além de possibilitar a determinação da probabilidade do risco de ruptura do talude.

Em posse dos dados, analisou-os estaticamente, por meio das medidas de tendência central (média, mediana e moda) e de dispersão (desvio padrão e variância), sendo realizados todos os cálculos estatísticos. Essas medidas têm a finalidade de resumir e descrever as características dos dados coletados, permitindo uma melhor compreensão do comportamento dos solos em questão. A análise estatística ajuda a verificar a variabilidade,

identificar padrões e, eventualmente, contribuir na tomada de decisões relacionadas à Engenharia Civil, especialmente no que diz respeito à estabilidade e segurança de estruturas. A partir dos resultados obtidos, organizou-se os dados em tabelas e gráficos, para aprimorar a visualização e interpretação. Posteriormente, cada gráfico foi analisado detalhadamente, destacando suas implicações.

Com os valores de medidas de tendência central e de dispersão, foi desenvolvido um modelo bidimensional de um talude fictício (Figura 7), desenvolvido com base em princípios de engenharia geotécnica utilizando o *software Slide2*. O modelo foi construído de acordo com (Silva; Silva, 2023), assim as coordenadas são apresentadas na Tabela 3. Em relação ao solo considerou-se uma camada de solo homogêneo tendo como parâmetros de entrada os dados coletados na literatura. O método de cálculo de equilíbrio limite utilizado em todas as análises foi o *GLE/Morgenstern Price*, por ser um método completo, pois considera tanto o equilíbrio de forças como o equilíbrio de momentos, tornando-o assim mais rigoroso do que os demais métodos.

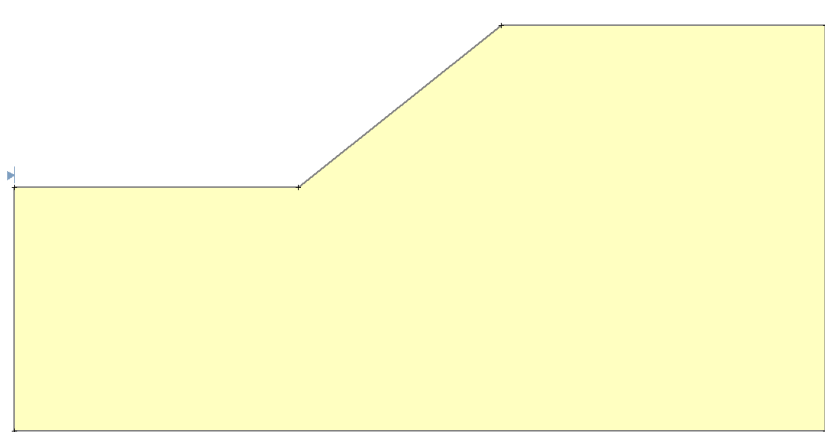


Figura 7 – Modelo bidimensional de talude fictício (Silva; Silva, 2023).

Tabela 3 – Coordenadas do modelo bidimensional de talude fictício

Coordenadas x	Coordenadas y
0.0	-20.0
35.0	-20.0
60.0	0.0
100.0	0.0
100.0	-50.0
0.0	-50.0

Fonte: (Silva; Silva, 2023).

As análises de estabilidade do talude foram divididas em duas etapas:

(i) **Análises determinísticas:** Foram realizadas cinco análises determinísticas, variando-se os parâmetros de entrada (coesão, ângulo de atrito e peso específico), com base nos valores obtidos estaticamente. Os cenários analisados foram:

- Média (\bar{x});
- Média + desvio padrão ($\bar{x} + s$);
- Média – desvio padrão ($\bar{x} - s$);
- Valor mínimo;
- Valor máximo.

Ressalta-se que na prática de engenharia é realizado apenas uma análise determinística utilizando a média dos parâmetros, porém o estudo visou demonstrar a influência da variabilidade dos dados.

(ii) **Análise probabilística:** Considerando a influência da variação dos parâmetros, foi realizada análise probabilística, para avaliar todos os cenários possíveis dentro dessas variações. Essa abordagem permitiu não apenas a obtenção do fator de segurança, mas também a probabilidade de ruptura do talude. Esse fator é essencial em uma análise mais robusta pois existem diversas incertezas englobadas na obtenção dos parâmetros mediante ensaios e também relacionadas com o método de equilíbrio limite. Destaca-se que nessa análise probabilística utilizou-se o método de amostragem de Monte Carlo e a distribuição Normal. Ademais, para realizar essa análise deve-se informar os valores de média, desvio padrão e relativo mínimo (média – valor mínimo) e relativo máximo (valor máximo – média) de cada parâmetro (coesão, ângulo de atrito e peso específico).




#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	Argila	Cohesion	 Normal	14.66	12.97	14.66	48.34
2	Argila	Phi	 Normal	27.44	5.45	22.24	11.36
3	Argila	Unit Weight	 Normal	15.49	2.43	5.17	5.21

Figura 8 – Parâmetros de entrada da análise probabilística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões foram divididos em três etapas: análises estatísticas, determinísticas e probabilísticas.

4.1 Análise estatística

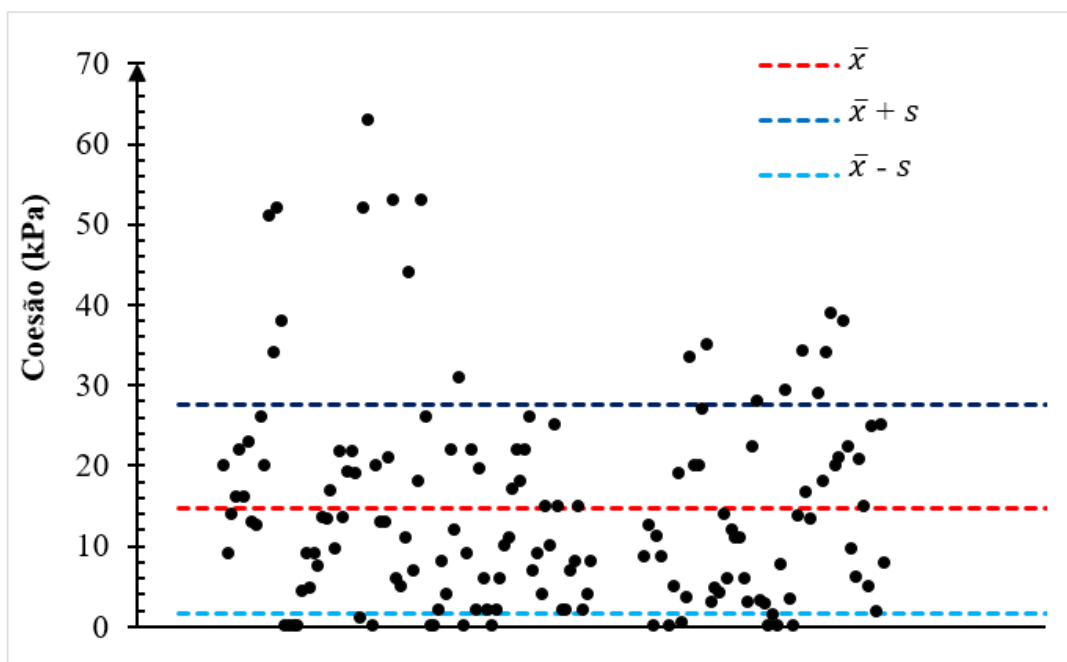
Realizou-se um levantamento de dados em diversos trabalhos referentes ao cisalhamento do solo do Distrito Federal. A partir desses estudos, determinou-se os dados necessários para realização das análises de estabilidade de talude: sendo, Coesão (kPa), Ângulo de Atrito ($^\circ$) e Peso Específico (kN/m^3).

Na Tabela 4 são apresentadas as medidas de tendência central e dispersão para a Coesão. A média, isoladamente, não proporciona uma compreensão completa da dispersão dos dados. Portanto, foram calculados o desvio padrão e a variância. Nota-se que a coesão possui uma dispersão considerável, como mostrado na Figura 9, onde a maioria dos pontos está dentro do intervalo definido pela média mais ou menos o desvio padrão, porém distantes da média. Isso revela uma dispersão significativa dos valores de coesão, indicando sua heterogeneidade, o que pode impactar a estabilidade, um fator essencial em estudos probabilísticos.

O desvio padrão ($12,97kPa$) corresponde a $88,47\%$ da média, o que é considerado um valor alto. A moda foi $0,00kPa$, representando $9,52\%$ do total. Além dessas medidas, obteve-se a mediana, o valor máximo e mínimo, que complementam a análise descritiva, embora não sejam utilizados na análise de estabilidade. Os principais parâmetros relevantes para nossa análise são a média e o desvio padrão.

Tabela 4 – Medidas de tendências central e de dispersão na coesão.

Coesão (kPa)	Valores
Média	14,66
Moda	0,00
Mediana	12,00
Desvio Padrão	12,97
Valor Máximo	63,00
Valor Mínimo	0,00
Variância	168,13



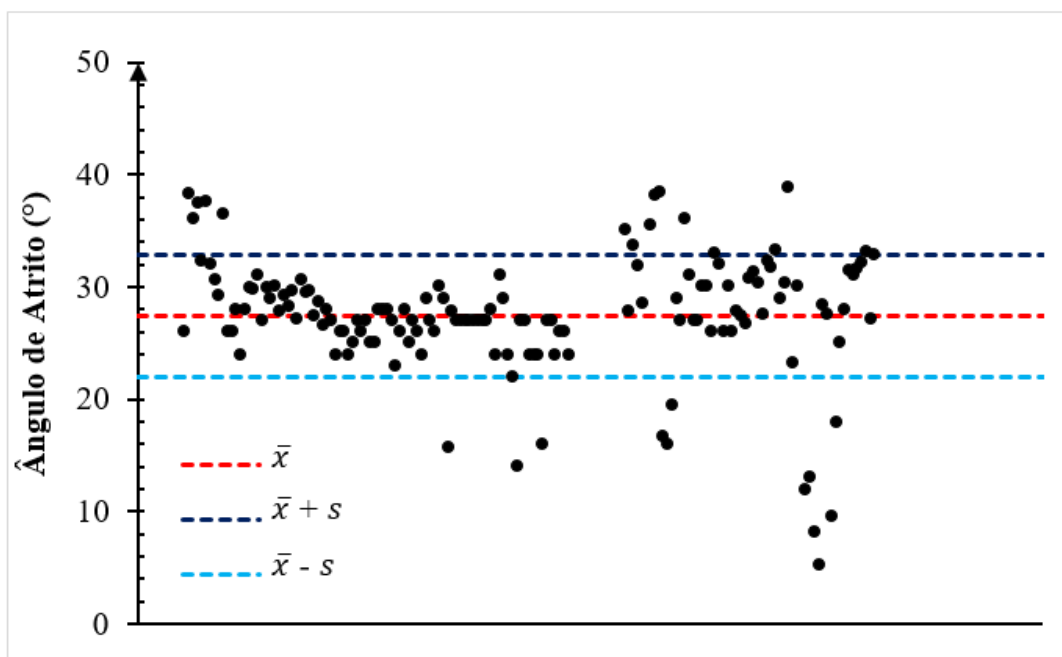
\bar{x} = Média; s = Desvio Padrão.

Figura 9 – Variabilidade de Coesão da argila porosa do Distrito Federal.

Já na Tabela 5, nota-se que a moda, $27,00^\circ$, repetiu-se 22 vezes (Figura 10), equivalente a 14,97% do total, e o desvio padrão $5,45^\circ$ equivale a 19,86% da média, o que é considerado baixo. Além disso, conforme pode-se observar na Figura 10, a maioria dos pontos está dentro do intervalo do desvio padrão e, como o desvio padrão foi baixo, os pontos estão próximos da média. Isso indica maior regularidade e homogeneidade, pois quanto menor o desvio padrão, menos dispersos são os dados do conjunto.

Tabela 5 – Medidas de tendências central e de dispersão no Ângulo de Atrito.

Ângulo de Atrito ($^\circ$)	Valores
Média	27,44
Moda	27,00
Mediana	27,50
Desvio Padrão	5,45
Valor Máximo	38,80
Valor Mínimo	5,20
Variância	29,72



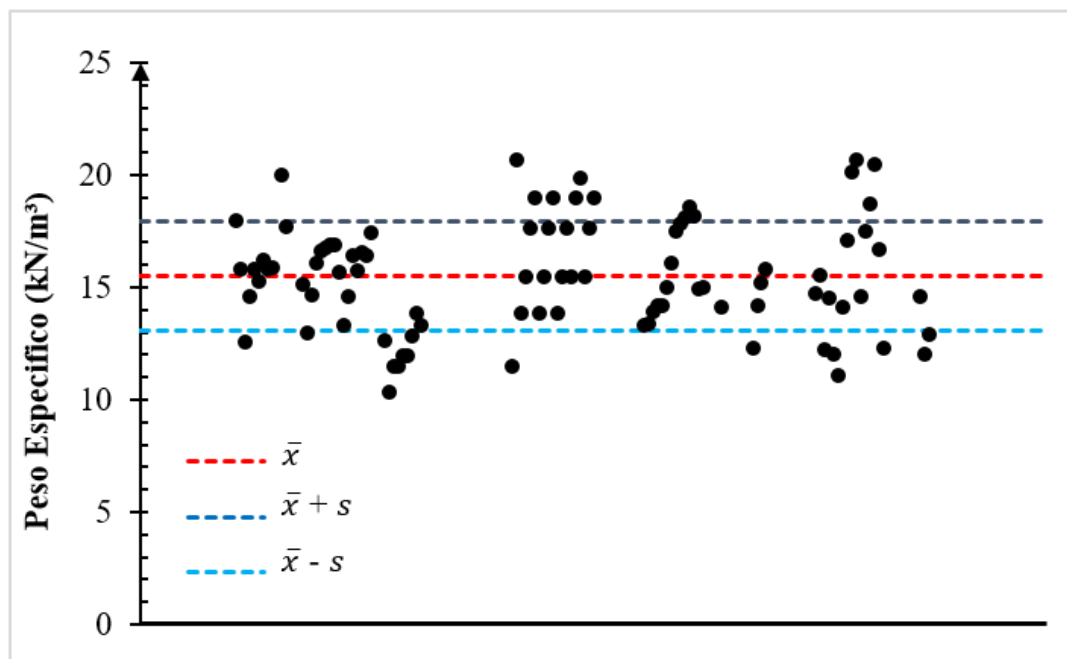
\bar{x} = Média; s = Desvio Padrão.

Figura 10 – Variabilidade do Ângulo de Atrito da argila porosa do Distrito Federal.

Na Tabela 6 percebe-se que o valor mais frequente, $15,45kN/m^3$, ocorreu em 5 ocasiões (Figura 11), representando aproximadamente 5,35% do total. O desvio padrão de $2,43kN/m^3$ corresponde a cerca de 15,73% da média. Além disso, conforme ilustrado na Figura 11, a maioria dos pontos está dentro do intervalo do desvio padrão, e muitos deles estão próximos à média devido o número baixo do desvio padrão. Isso indica uma maior uniformidade e consistência nos dados.

Tabela 6 – Medidas de tendências central e de dispersão no Peso Específico.

Peso Específico (kN/m^3)	Valores
Média	15,49
Moda	15,45
Mediana	15,45
Desvio Padrão	2,43
Valor Máximo	20,70
Valor Mínimo	10,32
Variância	5,92



\bar{x} = Média; s = Desvio Padrão.

Figura 11 – Variabilidade do Peso Específico da argila porosa do Distrito Federal.

Com o levantamento de dados e a determinação das medidas de tendência central e de dispersão, as próximas etapas do trabalho consistem em: manipulação de *software Slide2*, realização de análises determinística e probabilística e a demonstração da importância da estatística.

4.2 Análise determinística

Nesta seção, serão apresentados os resultados das análises determinísticas, como podem ser observados na Tabela 7. A partir dessas análises, foram identificadas superfícies de ruptura globais, resultando em um fator de segurança médio de 1,25, ou seja, valor inferior ao limite de 1,3 estabelecido pela NBR 11.682 (ABNT, 2009). Dessa forma, a estrutura não está em conformidade com as exigências normativas. Essa norma define critérios para a análise da estabilidade de taludes, considerando os níveis de segurança necessários para mitigar danos à vida humana, aos bens e ao meio ambiente, sendo amplamente aplicada em projetos de estabilização de taludes. De acordo com suas diretrizes, o fator de segurança mínimo aceitável é de 1,3 para condições de menor exigência de segurança, enquanto, para cenários que demandam maior estabilidade, o valor mínimo recomendado é de 1,5.

Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos nas análises determinísticas.

Parâmetros	Fatores de segurança
Média	1,25
Média + Desvio Padrão	1,72
Média – Desvio Padrão	0,64
Valor Máximo	2,59
Valor Mínimo	0,11

Ressalta-se que em duas análises (Média + Desvio Padrão e Valor Máximo) o $FS > 1,3$ o que, de acordo com a norma, indica a presença de regiões com estabilidade satisfatória. Entretanto em três análises (Média, Valor mínimo e Média – Desvio Padrão) notou-se que $FS < 1,3$, evidenciando áreas com alto risco de instabilidade e possível ruptura.

Portanto, a análise determinística apresenta limitações em termos de confiabilidade, pois se baseia em valores fixos que podem não representar adequadamente a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Os resultados dos ensaios podem variar significativamente dependendo da execução, do ponto de coleta das amostras e das condições do terreno. Dessa forma, análises distintas podem indicar fatores de segurança abaixo do mínimo exigido, sugerindo que o talude está propenso à ruptura, enquanto outras podem apontar valores acima do recomendado, indicando uma condição segura, o que pode gerar contradições na interpretação dos resultados.

Diante dessas incertezas, a análise probabilística se apresenta como uma abordagem mais precisa e robusta, pois incorpora a variação dos parâmetros e permite avaliar a probabilidade de ocorrência de um fator de segurança crítico. Ao considerar as incertezas envolvidas, essa metodologia oferece uma visão mais abrangente e confiável da estabilidade do talude, auxiliando na tomada de decisões mais seguras e embasadas.

4.3 Análise probabilística

A análise probabilística ao contrário da análise determinística, considera a variabilidade e incerteza dos parâmetros envolvidos, resultando em três possíveis cenários, quando comparados com a análise determinística:

FS probabilístico = FS determinístico: Neste caso, o fator de segurança determinístico e o probabilístico são iguais. Isso indica que, embora a análise probabilística considere as incertezas dos parâmetros, o risco global não se altera em relação à análise determinística.

FS probabilístico < FS determinístico: Aqui, a análise probabilística revela que o fator de segurança é menor do que o estimado pela análise determinística. Isso

pode indicar que a estrutura, que parecia segura na análise determinística, na realidade, apresenta maior risco de falha quando se considera a incerteza dos parâmetros. Esse resultado sugere que a estrutura pode não ser tão segura quanto inicialmente avaliado, e, portanto, pode precisar de contenções ou modificações no projeto.

FS probabilístico > FS determinístico: Neste cenário, o fator de segurança probabilístico é superior ao determinístico. Isso sugere que, ao considerar a incerteza nos parâmetros, a estrutura tem um nível de segurança maior do que o antecipado na análise determinística. Com esse conhecimento, é possível otimizar os custos, sem comprometer a segurança.

Em vista disso, apresentamos os resultados da análise probabilística para o talude hipotético, que, ao considerar essas variações nos fatores de segurança, oferece uma visão mais abrangente da segurança do talude. Na Figura 12, observa-se o FS (*deterministic*),

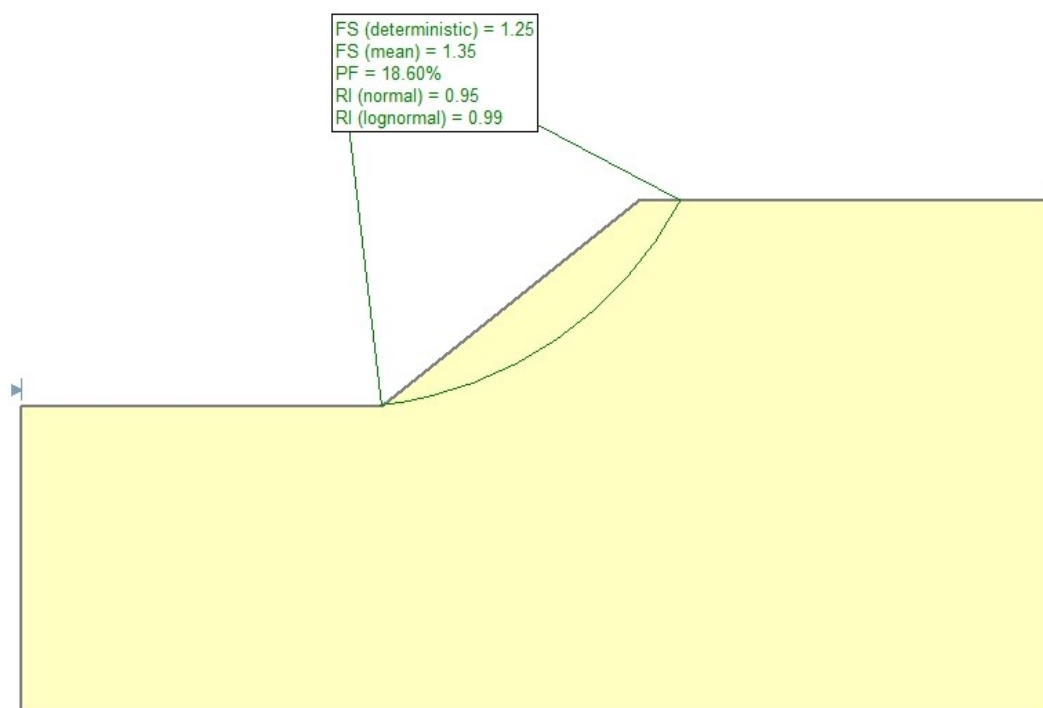


Figura 12 – Análise de estabilidade probabilística, aplicando o método de Monte Carlo.

que representa o fator de segurança da superfície de deslizamento mínimo global, obtido por meio de uma análise regular (não probabilística) de estabilidade de talude. Em comparação, apresenta-se o FS (*mean*), que é o fator de segurança médio resultante da análise probabilística. Nota-se que o fator de segurança probabilístico foi superior ao fator de segurança determinístico. Essa diferença está relacionada à elevada variabilidade da coesão nos parâmetros geotécnicos. O valor relativo máximo da coesão ($48,34kN/m^2$) é significativamente maior em comparação ao valor relativo mínimo ($14,66kN/m^2$), o que exerce influência direta no aumento do fator de segurança médio na análise probabilística. Pois, a coesão é o parâmetro com maior influência na resistência ao cisalhamento (τ),

conforme a Equação (4.1).

$$\tau = c' + \tan \phi' \quad (4.1)$$

Apesar do FS probabilístico ser maior que FS determinístico, a análise mostrou uma probabilidade de falha (PF) do talude de 18,60%, o que significa que, dentre das 1000 amostras analisadas, 186 superfícies de rupturas apresentaram $FS \leq 1$. Além disso, os dois índices de confiabilidade (RI), tanto na distribuição normal quanto na *lognormal*, apresentaram valores baixos, ambos inferiores a 3, o qual, é o valor recomendado como garantia mínima para segurança do talude. Isto é, esses índices sugerem que a margem de segurança contra a ruptura é insuficiente.

Dessa forma, embora o FS probabilístico tenha sido maior que o FS determinístico, os demais indicadores (PF, RI normal e RI *lognormal*) demonstraram que o talude não atende os critérios adequados de segurança. Esse resultado reforça a importância de uma abordagem probabilística para evitar uma falsa sensação de estabilidade e fundamentar decisões mais precisas. Além desses índices, a análise probabilística fornece gráficos de histograma, acumulativo, dispersão e convergente, conforme as Figuras 13 e 14.

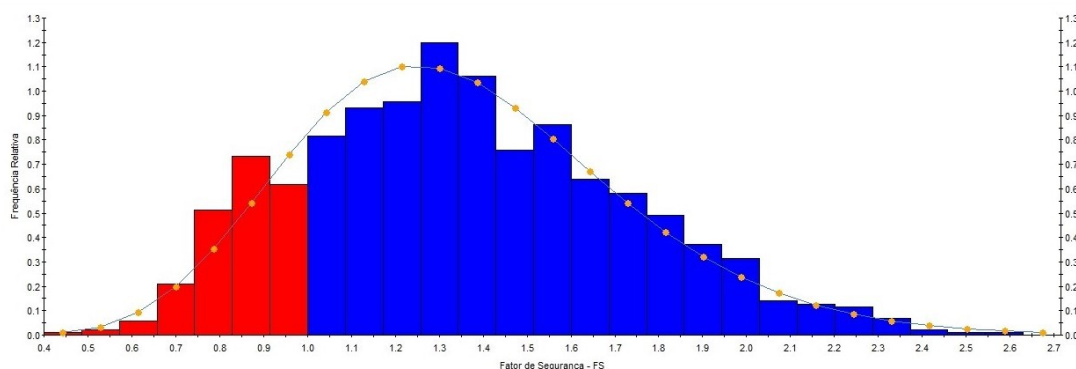


Figura 13 – Histograma, relação Fator de Segurança vs Frequência Relativa.

Conforme podemos observar no histograma (Figura 3) apresentado, uma parcela das amostras resultou em fatores de segurança inferiores a 1, destacadas em vermelho no gráfico. Esse comportamento indica que, nessas simulações, o talude atingiu condição de ruptura, ou seja, apresentou instabilidade. Esse cenário de falha corresponde a 18,6% das análises realizadas, representando uma probabilidade de falha significativa para o talude em questão, como pode ser observado no gráfico de probabilidade acumulativa (Figura 14), no qual destaca-se que a soma das frequências relativas até $FS \leq 1$ corresponde a probabilidade de ruptura de 18,6%.

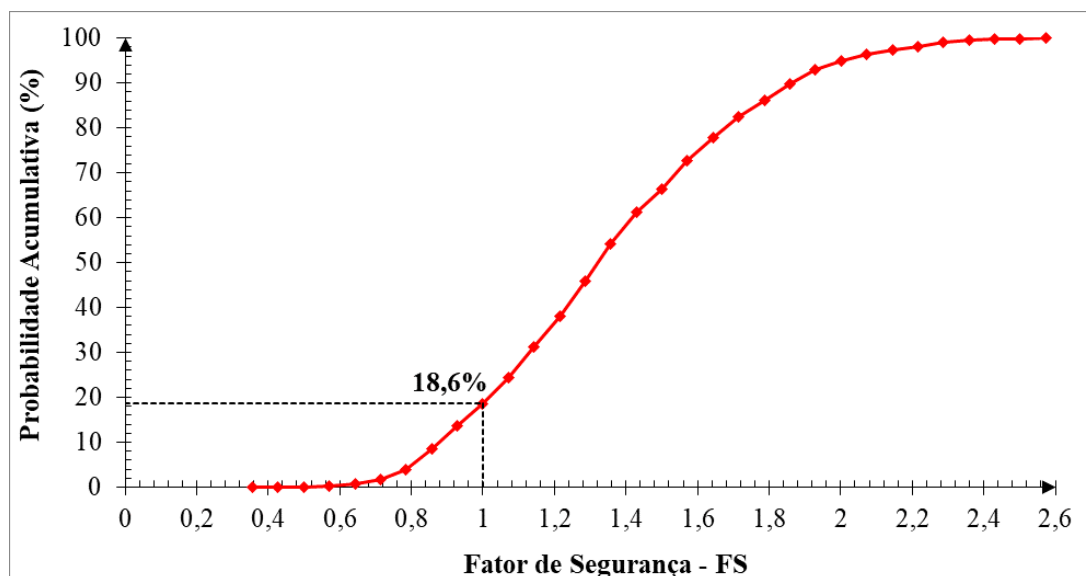


Figura 14 – Gráfico acumulativo, relação Fator de Segurança vs Frequência Acumulada.

Observa-se na Figura 15, que nos estágios iniciais (com poucas amostras) há uma alta variabilidade na estimativa da PF, com valores que atingem até 66,67%, o que reflete a baixa representatividade estatística nesse momento. No entanto, à medida que o número de amostras aumenta, a curva se estabiliza e converge para um valor próximo de 18,6%, indicado pela linha vermelha pontilhada. Esse comportamento confirma que a quantidade de simulações realizadas foi suficiente para garantir a convergência da análise e assegurar uma estimativa confiável da probabilidade de ruptura do talude.

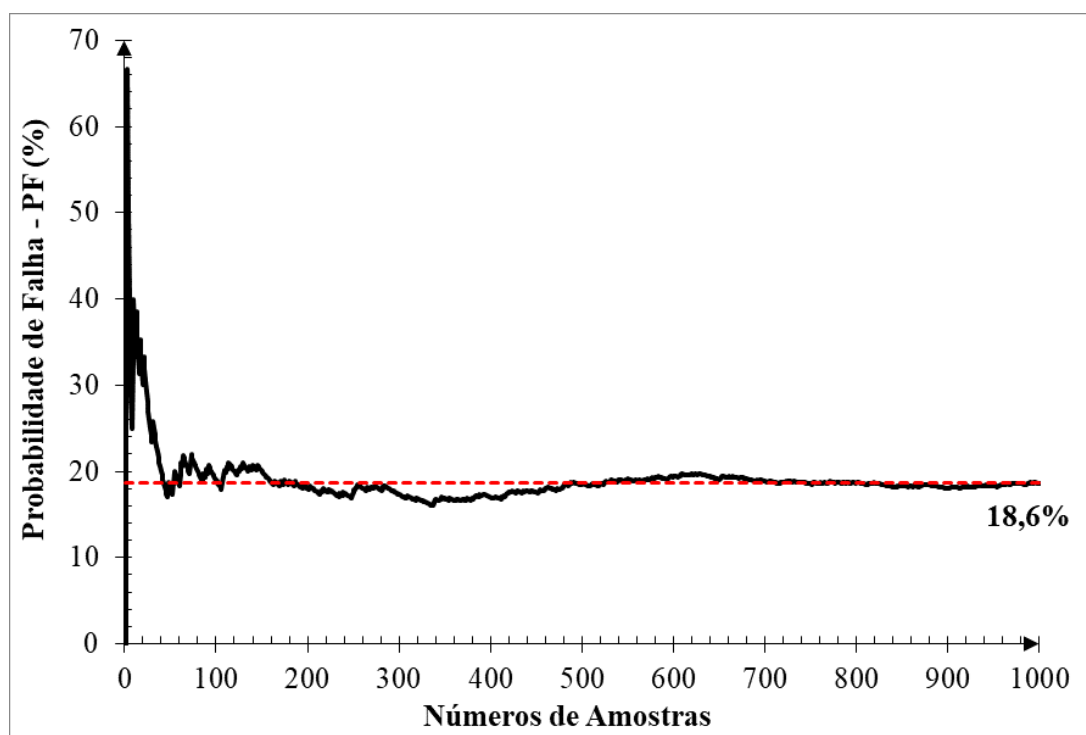


Figura 15 – Gráfico de Convergência, relação Números de Amostras vs Probabilidade de Falha.

Na Figura 16 tem-se o gráfico de dispersão da relação entre coesão (kN/m^2) e o Fator de Segurança (FS) do talude em uma análise probabilística de estabilidade. A reta traçada no gráfico reflete a tendência média entre os pontos, evidenciando um comportamento ascendente, indicando que a relação entre coesão e fator de segurança é diretamente proporcional ($\uparrow c'$ e $\uparrow FS$), destacando a influência direta da coesão na segurança do talude, conforme demonstra a Equação (4.1). Os pontos azuis representam situações estáveis, onde o $FS > 1$, enquanto os pontos vermelhos indicam condições críticas, com $FS \leq 1$, sugerindo risco de instabilidade e possível ruptura do talude. Além disso, observa-se que não há grande dispersão dos resultados, com um coeficiente de correlação de 0,84. Quanto mais próximo de 1 for esse valor, menor a dispersão, o que sugere maior confiabilidade nas condições de estabilidade do talude.

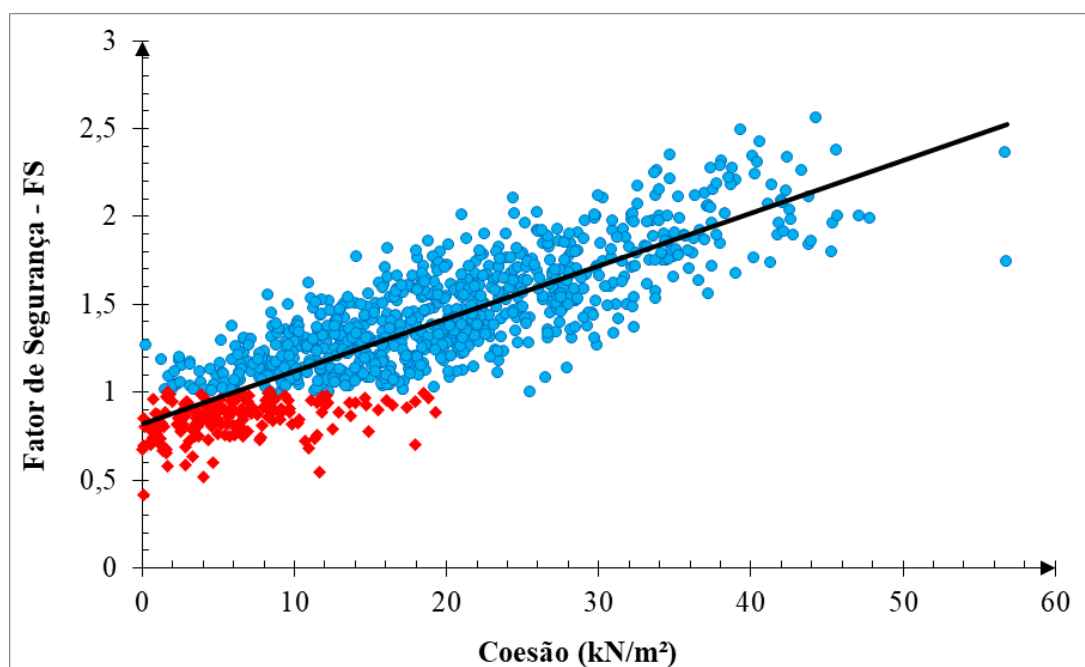


Figura 16 – Curva de dispersão, relação Coesão vs Fator de Segurança.

Ademais, nota-se que para valores de coesão superiores a $20kN/m^2$, não ocorre ruptura, essa tendência é reforçada pelo histograma (Figura 17, no qual as barras vermelhas representam a frequência relativa de taludes com $FS \leq 1$).

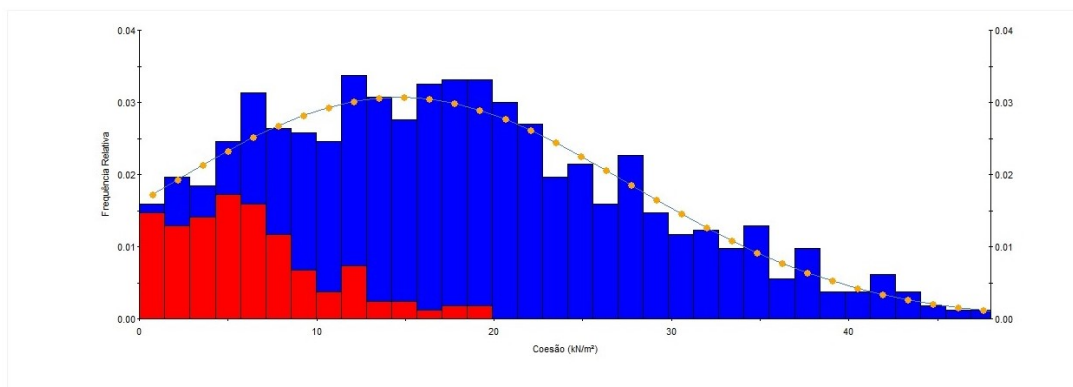


Figura 17 – Histograma, relação Coesão vs Frequência Relativa.

Já a Figura 18 consiste no gráfico de dispersão da relação entre ângulo de atrito ($^{\circ}$) e o Fator de Segurança (FS) do talude. Assim como no gráfico de coesão, a reta traçada para o ângulo de atrito também reflete a tendência média entre os pontos, evidenciando um comportamento ascendente, o que indica que a relação entre ângulo de atrito e fator de segurança é diretamente proporcional ($\uparrow \phi'$ e $\uparrow FS$). No entanto, observa-se que este gráfico apresenta uma maior dispersão dos resultados, com um coeficiente de correlação de 0,48, indicando uma relação mais fraca entre os parâmetros.

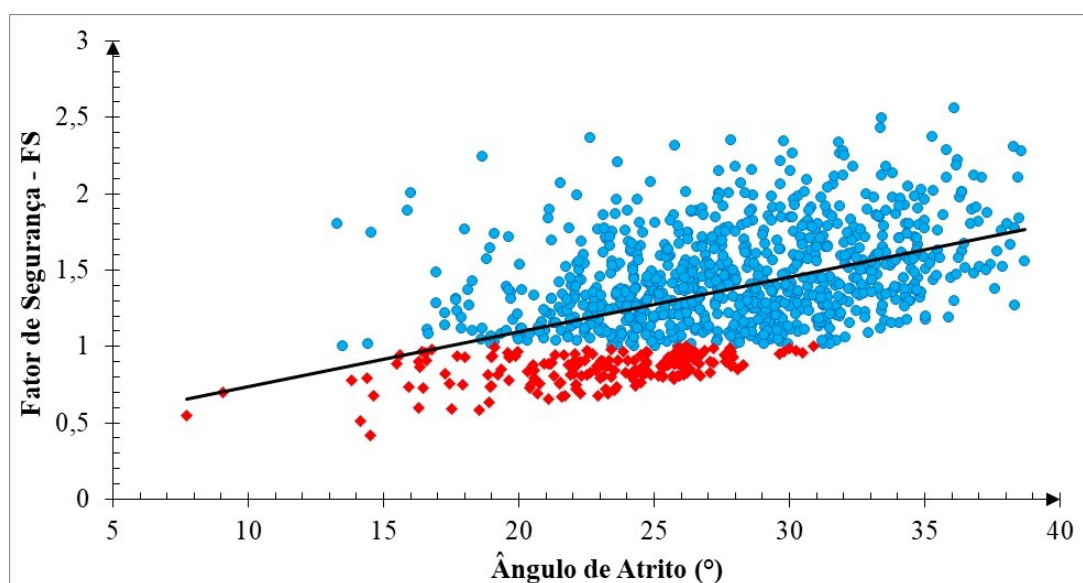


Figura 18 – Curva de dispersão, relação Ângulo de Atrito vs Fator de Segurança.

Além do mais, para valores de ângulo de atrito superiores a 31° representados pelos pontos azuis, não ocorre ruptura. Essa observação é confirmada pelo histograma (Figura 19), no qual as barras azuis correspondem aos taludes com $FS > 1$, e as barras vermelhas representam a frequência relativa de taludes com $FS \leq 1$.

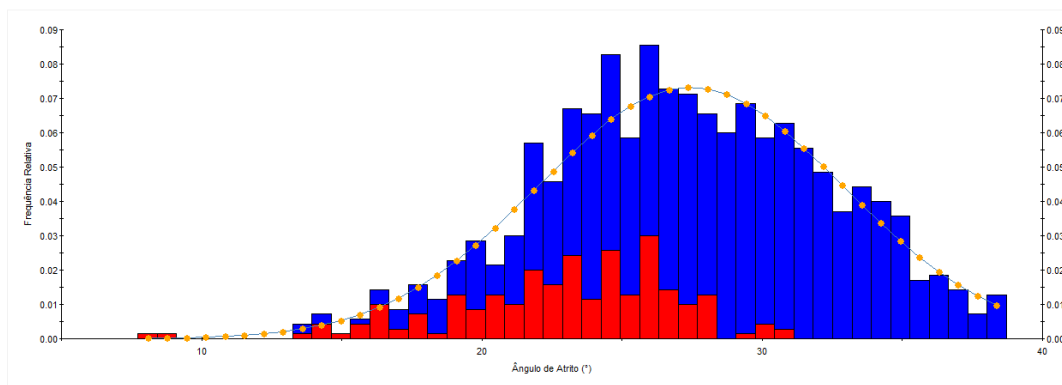


Figura 19 – Histograma, relação Ângulo de Atrito vs Frequência Relativa.

Por fim, a Figura 20 corresponde ao gráfico de dispersão da relação entre o peso específico (kN/m^3) e o Fator de Segurança (FS) do talude. Ao contrário dos gráficos anteriores (coesão e ângulo de atrito), nos quais a relação entre os parâmetros é direta, neste gráfico de peso específico, a reta de tendência é decrescente. Isso ocorre pois, quanto maior o peso específico do solo, menor será o fator de segurança ($\uparrow \gamma$ e $\downarrow FS$), isto é, relação inversamente proporcional. Fisicamente este resultado demonstra que o maior peso da cunha de ruptura gera uma maior carga sobre o talude, comprometendo sua estabilidade e, conseqüentemente, reduzindo o fator de segurança. Além do que, independentemente do valor do peso específico, sempre existem amostras com fator de segurança inferior a 1, indicando risco de ruptura. Pois, a depender da resistência ao cisalhamento (Equação (4.1)) pode haver ruptura do talude independente do peso específico do solo.

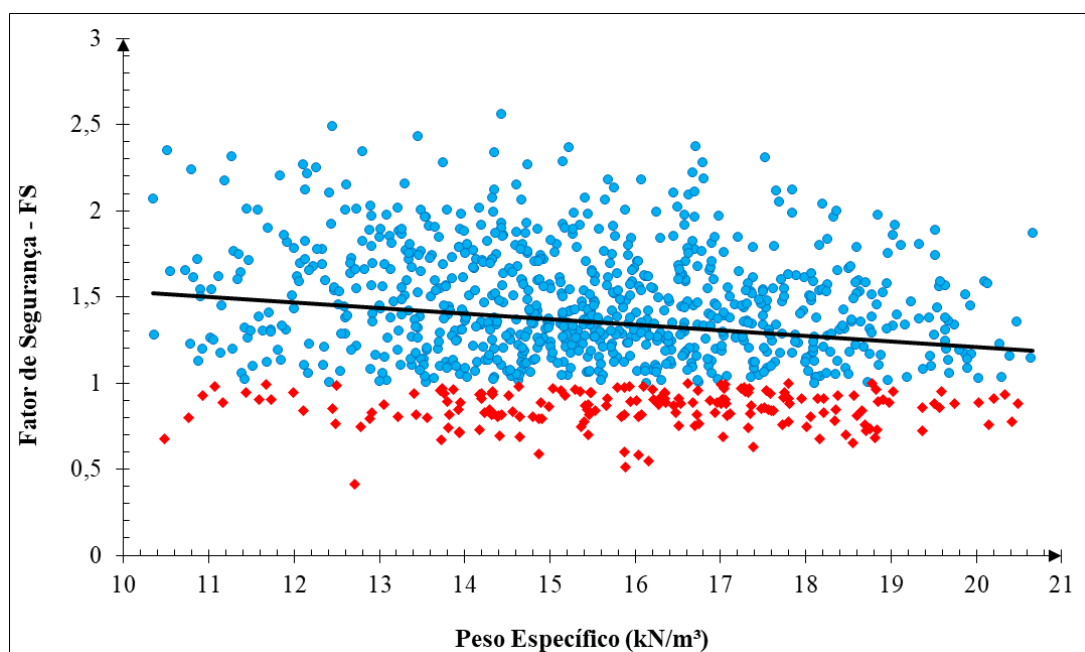


Figura 20 – Curva de dispersão, relação Peso Específico vs Fator de Segurança.

Essa observação é confirmada pelo histograma (Figura 21), no qual nota-se que as

barras vermelhas estão posicionadas abaixo das azuis ao longo de todo o gráfico. As barras azuis correspondem aos taludes com $FS > 1$, enquanto as barras vermelhas representam a frequência relativa dos taludes com $FS \leq 1$.

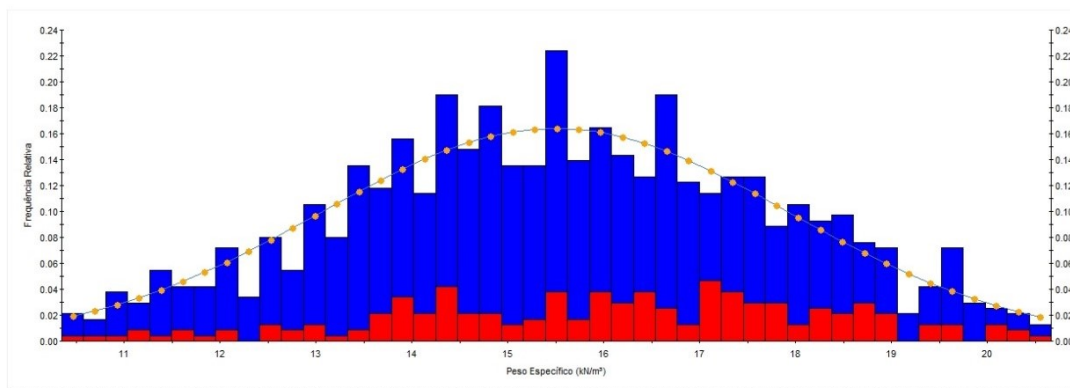


Figura 21 – Histograma, relação Peso Específico vs Frequência Relativa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados, este estudo destacou a importância da Estatística no campo da Engenharia Civil, evidenciando seu impacto direto e significativo na sociedade. O trabalho demonstrou que, além de fornecer ferramentas essenciais para a análise e interpretação de dados, a Estatística desempenha um papel crucial na prevenção de riscos, contribuindo para decisões mais precisas que impactam diretamente a segurança e o bem-estar das pessoas.

A análise da estabilidade de talude, em particular, ilustrou como a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, como a resistência ao cisalhamento do solo, pode ser melhor compreendida e gerenciada por meio de métodos estatísticos. A capacidade de estimar com maior precisão o fator de segurança e de determinar a probabilidade de falha é essencial para o planejamento adequado das obras e para a implementação de medidas de mitigação de riscos. Esses resultados reforçam a importância da Estatística como ferramenta indispensável para a tomada de decisões mais seguras.

Embora se utilizem simplificações, como cálculos analíticos baseados em parâmetros médios obtidos de ensaios, a Estatística oferece uma representação mais precisa, pois considera a variabilidade e incerteza dos parâmetros envolvidos, o que permite prever comportamentos em cenários reais de forma mais confiável.

Além disso, o trabalho mostrou que a Estatística vai além de uma disciplina acadêmica, sendo uma ferramenta vital para a construção de um futuro mais seguro e sustentável. Portanto, a aplicação eficaz dessas técnicas pode contribuir para que as obras atendam às necessidades da sociedade e, ao mesmo tempo, protejam vidas e recursos naturais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NORMA BRASILEIRA: NBR 11682 - Estabilidade de encostas** . [S.l.], 2009. Citado na página 31.
- ABRAMSON, L. W. *et al.* **Slope stability and stabilization methods**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. Citado na página 19.
- ALFREDO, H.-S. A.; WILSON, H. Probability concepts in engineering planning and design. **John Wily and Sons**, v. 268, 1975. Citado na página 17.
- ARAKI, M. **Aspectos relativos às propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil, 1997. Citado na página 25.
- BARBOSA, M. H. B. **Estabilidade de Taludes de Barragens: Comparação entre Análises por Métodos de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos**. Dissertação (Monografia de Graduação) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2019. Citado na página 25.
- BÍBLIA. A bíblia sagrada: versão almeida. **Brasília: Sociedade Bíblica do Brasil. Números 1:1-3; Lucas 2:1-7**, 1995. Citado nas páginas 13 e 14.
- BURGOS, J. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2016. Citado na página 25.
- CARDOSO, F. **Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2002. Citado na página 25.
- COSTA, P. R. d. **Estatística**. 3. ed. [S.l.]: Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. Citado na página 14.
- CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 17^o ed. **São Paulo: Saraiva Educação**, 2002. Citado na página 13.
- CÁRDENAS, J. **Análise do comportamento de cortina de estacas executada em solo poroso metaestável mediante o uso de um modelo constitutivo hipoplástico considerando a resposta não saturada**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2014. Citado na página 25.
- DOWNING, D.; CLARK, J. **Estatística aplicada. Tradução Alfredo Alves de Farias**. 3. ed. [S.l.]: São Paulo: Saraiva, 2011. Citado na página 16.
- FABRÍCIO, J. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contensões**. Tese (Dissertação de Mestrado) — PUC, Rio de Janeiro, 2006. Citado nas páginas 8 e 18.

FARIAS, W. **Processos Evolutivos de Intemperismo Químico e Sua Ação no Comportamento Hidromecânico de Solos do Planalto Central**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2012. Citado na página 25.

GARCIA, J. **Estudo do mecanismo de transferência de carga na camada de distribuição em fundações reforçadas com inclusões rígidas**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2021. Citado na página 25.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. [S.l.]: São Paulo: Oficina de Textos, 2016. Citado nas páginas 18 e 19.

GUIMARÃES, R. **Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2002. Citado na página 25.

INESUL. **Inesul destaca a importância da estatística no mundo contemporâneo**. 2007. Disponível em: <<http://www.inesul.edu.br/maranhao/mat3.htm>>. Citado na página 15.

MASSOCCO, N. **Avaliação do efeito da estrutura na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento de um solo laterítico**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2023. Citado na página 25.

MEIRA, G. **Uso dos Métodos Sísmicos de Refração e MASW para Investigação e Caracterização de Taludes**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2022. Citado na página 25.

MOREIRA, T. J. R. V.; SANTOS, M. R.; MOREIRA, A. L. Estatística básica para cursos de graduação. In: _____. Teresina: EdUESPI, 2021. v. 1. Disponível em: <<https://editora.uespi.br/index.php/editora/catalog/book/58>>. Citado na página 17.

MORTARI, D. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1994. Citado na página 25.

MOTA, N. **Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação**. Tese (Tese de Doutorado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2003. Citado na página 25.

NETO, R. V. W. **Estudo experimental de interfaces solo-concreto no contexto de solos não saturados**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2020. Citado na página 25.

PEIXOTO, R. **Aplicação de Modelos Constitutivos na avaliação Comportamento Mecânico da Argila Porosa Colapsível do Distrito Federal**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 1999. Citado na página 25.

PORTELLA, A. C. F. *et al.* Estatística básica para os cursos de ciências exatas e tecnológicas. 2015. Citado na página 15.

QUIRINO, D. S. **Análise Crítica do Método da Extremidade Livre em Solos Não Saturados com Base em Elementos Finitos**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2004. Citado na página 25.

REZENDE, D. **Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos**. Tese (Projeto de Graduação) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Citado nas páginas 17 e 18.

RIBEIRO, G. **Estudo da Influência da Saturação na Interação Solo de Fundação/Estaca de Solo-cimento**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1999. Citado na página 25.

ROBERT, C. P.; CASELLA, G. **Introducing Monte Carlo Methods with R**. [S.l.]: Springer-Verlag New York, 2010. Citado na página 22.

ROCSCIENCE. **Site do Rocscience**. 2025. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/probabilistic-analysis-tutorial>>. Citado nas páginas 8, 23 e 24.

SANTOS, M. A. A. **Influência das Condições Tridimensionais de Tensão e Fluxo na Estabilidade de Um Talude em Solos Não Saturados**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Citado na página 25.

SILVA, B. W. G. **Estudo do Efeito do Truncamento dos Parâmetros de Entrada na Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes**. Tese (Monografia de Projeto Final) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2017. Citado na página 25.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de Alegria utilizando abordagem probabilística**. Tese (Dissertação de Mestrado) — NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, 2015. Citado nas páginas 18, 19, 21 e 22.

SILVA, E. B.; SILVA, R. C. Curso análise de estabilidade de taludes com uso do slide 2 da rocscience. 2023. Citado nas páginas 8, 19, 20 e 26.

SILVA, J. D. **Estudo da Colapsibilidade da Argila Porosa de Brasília pelo Fluxo de Contaminantes**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2006. Citado na página 25.

SPIEGEL, M. R. **ESTATÍSTICA. Tradução Pedro Cosentino**. 3. ed. [S.l.]: São Paulo: MAKRON Books, 1993. Citado na página 16.

TOLEDO, G. L.; OVALLE, I. I. **Estatística básica**. 2. ed. [S.l.]: São Paulo: Atlas, 1985. Citado na página 23.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística. Tradução Vera Regina Lima de Farias e Flores**. 10. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado nas páginas 16, 17 e 22.

VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 21.