



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PATRICIA ARIEL ARAUJO FONSECA

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA SOB
IMPACTO DE ANOMALIAS GEOTÉCNICAS PROGRESSIVAS: UMA
ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

Belo Horizonte - MG

2026



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PATRICIA ARIEL ARAUJO FONSECA

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA SOB
IMPACTO DE ANOMALIAS GEOTÉCNICAS PROGRESSIVAS: UMA
ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini

Belo Horizonte/MG

2026

F676a Fonseca, Patricia Ariel Araujo
Avaliação da estabilidade de uma barragem de terra sob impacto de anomalias geotécnicas progressivas: uma abordagem determinística e probabilística / Patricia Ariel Araujo Fonseca. – 2026.
99 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil.
Orientador: Thiago Luiz Coelho Morandini.
Bibliografia: f. 97-99.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Barragens de terra – Segurança – Teses. 2. Engenharia Geotécnica – Teses. 3. Mecânica dos solos – Teses. 4. Confiabilidade (Engenharia) – Teses. 5. Deformações (Mecânica) – Teses. 6. Probabilidades – Modelos – Teses. 7. Percolação – Teses. I. Morandini, Thiago Luiz Coelho. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 627.8



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 17/2026 - DEC (11.56.07)

Nº do Protocolo: 23062.034610/2026-25

Belo Horizonte-MG, 04 de julho de 2026.

PATRICIA ARIEL ARAUJO FONSECA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA SOB IMPACTO DE ANOMALIAS GEOTÉCNICAS PROGRESSIVAS: uma abordagem determinística e probabilística

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 19 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Hersilia de Andrade e Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Chan Kou Wha
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**BELO HORIZONTE
2026**

(Assinado digitalmente em 04/07/2026 10:28)

CHAN KOU WHA

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DET (11.55.11)

Matricula: ###960#2

(Assinado digitalmente em 05/07/2026 21:09)

HERSILIA DE ANDRADE E SANTOS

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

PPGEC (11.52.06)

Matricula: ###049#6

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 08:42)

THIAGO LUIZ COELHO MORANDINI

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEC (11.56.07)

Matricula: ###172#6

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 00:54)

PATRÍCIA ARIEL ARAÚJO FONSECA

DISCENTE

Matricula: 2020#####4

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **17**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **04/07/2026** e o código de verificação: **61cb1caad4**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Título do TCC:	AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA SOB IMPACTO DE ANOMALIAS GEOTÉCNICAS PROGRESSIVAS: UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA
Data defesa:	19/06/2026
Discente:	Patricia Ariel Araujo Fonseca
Orientador:	Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini

Eu, Patricia Ariel Araujo Fonseca (*nome do discente*) declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof(a). Dr. Thiago Luiz Coelho Morandini (*nome do professor orientador*) para validação final.

Documento assinado digitalmente
gov.br PATRICIA ARIEL ARAUJO FONSECA
Data: 09/07/2026 15:04:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

De acordo: Belo Horizonte, 30 de junho de 2026,

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

Documento assinado digitalmente
gov.br THIAGO LUIZ COELHO MORANDINI
Data: 08/07/2026 18:43:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

De acordo: Belo Horizonte, 30 de junho de 2026,

Assinatura do Orientador

AGRADECIMENTOS

Depois de anos de dedicação, risadas, choros, erros, recomeços e muito estudo, como é gratificante chegar até aqui. Olhar para trás e ver todos os momentos de descanso e lazer que foram abdicados, me faz ter a certeza de que trilhei o caminho certo. A engenharia me tornou mais forte a cada desafio superado. Agradeço a Deus por ter me sustentado durante todo esse período, dando-me força, saúde, proteção, persistência, determinação e uma rede de apoio que me fortaleceu nos dias difíceis. A minha mãe Sandra e meu pai Cedimar, essa conquista é nossa. Vocês foram todo o meu alicerce ao longo desse período; obrigada pelo esforço em me proporcionar uma educação básica de qualidade, pois isso foi fundamental para que eu chegasse aonde estou hoje.

A toda a família Araújo, obrigada pela relação de cumplicidade incrível que temos. À minha avó Dirce, como é doloroso não a ter neste momento; lembro-me das conversas e orações em que desejava que eu tivesse muito sucesso. Levarei sempre comigo os aprendizados de nossa amizade. À minha tia Mone, nunca esquecerei o quão gratificante foi sua alegria ao me ver entrar na faculdade. Vivenciar duas perdas e continuar cumprindo tarefas e obrigações naquele período foi, sem dúvidas, o maior desafio de toda essa trajetória, e guardarei ambas em minha memória com muito carinho.

Agradeço imensamente aos meus gestores, que foram fundamentais na minha trajetória profissional. O convívio diário e os desafios propostos foram grandes fontes de aprendizado, permitindo-me crescer não apenas como técnica, mas como profissional comprometida com a excelência.

Em especial, expresso minha gratidão ao meu orientador, Thiago Morandini, pelas valiosas instruções, pela paciência e pela condução ética e técnica que tornaram este trabalho possível. Suas contribuições foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico. À professora Isabella Labarrere, meu sincero agradecimento pela ajuda de sempre. Sua disponibilidade e apoio constante foram pilares importantes para que eu pudesse superar os desafios ao longo desta jornada. Seguirei confiando nos planos de Deus e me esforçando para alcançar meus sonhos!

RESUMO

Este trabalho avalia a sensibilidade da estabilidade de uma barragem de terra diante do acúmulo de anomalias geotécnicas progressivas, comparando análises determinísticas e probabilísticas para quantificar a variação da segurança e o risco de ruptura da estrutura. A metodologia consiste em uma pesquisa quantitativa e explicativa, baseada em simulação computacional acadêmica e hipotética desenvolvida no *software* Slide2D. O estudo modela o comportamento da seção sob cinco cenários cumulativos: operação normal, dreno colmatado, dreno colmatado associado a surgência, adição de trinca saturada e descontinuidade geométrica no pé do talude. A avaliação determinística aplica os métodos de Equilíbrio Limite de Morgenstern-Price, Sarma e Spencer para obter o Fator de Segurança global. Em complemento, a etapa probabilística emprega o Método da Superfície de Resposta (RSM) com distribuição normal baseada em 1000 amostragens estatísticas. Esse método introduziu a variabilidade espacial das propriedades dos materiais — especificamente da coesão efetiva, do ângulo de atrito efetivo e do peso específico — para o cálculo do Índice de Confiabilidade (β) e da Probabilidade de Ruptura (P_f). A análise numérica indicou que o Fator de Segurança reduz aceleradamente à medida que os sistemas de drenagem falham e as pressões neutras se elevam, decaindo de 1,74 no cenário base para o valor crítico de 1,04 na condição mais degradada. A investigação probabilística revelou um contraste drástico no nível de segurança da estrutura: enquanto o cenário base apresentou plena estabilidade, com Probabilidade de Ruptura nula ($P_f = 0,0\%$) e elevado Índice de Confiabilidade ($\beta = 5,20$), as condições apontadas como de estabilidade marginal pelo determinismo tradicional ocultam um risco severo. No cenário mais crítico, a Probabilidade de Ruptura atinge a marca alarmante de 29,8%, refletindo-se na queda brusca do Índice de Confiabilidade para patamares próximos de zero ($\beta = 0,54$), configurando profunda não conformidade legal nas situações mais críticas. O estudo concluiu que, embora os laudos estáticos e os métodos determinísticos sejam fundamentais e indispensáveis para a atestação primária da estabilidade, a segurança global exige o monitoramento contínuo da integridade física e hidráulica do maciço. Ademais, evidencia-se que a modelagem probabilística atua como um poderoso complemento analítico, sendo capaz de revelar cenários de iminência de colapso ao traduzir as incertezas inerentes do subsolo em indicadores quantitativos de risco.

Palavras-chave: Segurança de barragens. Geotecnia. Equilíbrio limite. Confiabilidade. Anomalias geotécnicas. Barragem de terra. Modelagem probabilística. Fator de segurança. Percolação.

ABSTRACT

This study evaluates the sensitivity of an earth dam's stability to the accumulation of progressive geotechnical anomalies, comparing deterministic and probabilistic analyses to quantify safety variations and the structure's probability of failure. The methodology consists of a quantitative and explanatory research based on an academic and hypothetical computational simulation developed using the Slide2D software. The study models the cross-section's behavior under five cumulative scenarios: normal operation, clogged drain, clogged drain associated with seepage, addition of a saturated crack, and geometric discontinuity at the toe of the slope. The deterministic evaluation applies the Limit Equilibrium methods of Morgenstern-Price, Sarma, and Spencer to obtain the global Factor of Safety. Additionally, the probabilistic stage employs the Response Surface Method with a normal distribution to calculate the reliability index and the probability of failure considering the variability of the adopted parameters. The numerical analysis indicates that the Factor of Safety decreases rapidly as the drainage systems fail and pore water pressures rise, dropping from 1.74 in the baseline scenario to a critical value of 1.04 in the most degraded condition. The probabilistic investigation reveals that conditions identified as marginally stable by traditional determinism hide severe failure probabilities reaching up to 29.8%, combined with reliability indices close to zero, representing deep non-compliance with legislation in the most critical situations. The study concludes that, although static reports and deterministic methods are fundamental and indispensable for the primary attestation of stability, global safety requires continuous monitoring of the embankment's physical and hydraulic integrity. Furthermore, it is evident that probabilistic modeling acts as a powerful analytical complement, capable of revealing scenarios of imminent collapse by translating the inherent uncertainties of the subsoil into quantitative risk indicators.

Keywords: Dam safety. Geotechnics. Limit equilibrium. Reliability. Geotechnical anomalies. Earth dam. Probabilistic modeling. Factor of safety. Seepage.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo confinado bimendisional.	19
Figura 2 – Filtro vertical.	20
Figura 3 – Filtro horizontal tipo "sanduíche".	21
Figura 4 – Gráfico da Envoltória de Coulomb ilustrando a reta com intercepto c e inclinação ϕ , separando a zona estável da zona de ruptura.	23
Figura 5 – Esquema da Analogia de Terzaghi ilustrando o cilindro com a mola (esqueleto sólido) e a água (vazios), demonstrando a transferência de carga.	24
Figura 6 – Tensões de ruptura, Reta de Coulomb e Círculo de Mohr.	25
Figura 7 – Critério de Mohr Coulomb, com o círculo de tensões tangenciando a envoltória de resistência no ponto de ruptura.	25
Figura 8 – Esquema do aparelho de Compressão Triaxial, contendo a câmera, a membrana de borracha confinante e o pistão vertical de carga.	26
Figura 9 – Diagrama com os Círculos de Mohr gerados a partir do ensaio triaxial, tangenciados pela Envoltória de Resistência, evidenciando a extração gráfica de c e ϕ	27
Figura 10 – Fatias subdivididas na cunha de ruptura e forças atuantes em cada lamela.	28
Figura 11 – Forças internas atuantes no Método Morgenstern-Price.	30
Figura 12 – Forças atuantes na fatia infinitesimal pelo método Morgenstern-Price.	30
Figura 13 – Forças atuantes nas fatias no Método de Spencer.	33
Figura 14 – Exemplo real de surgência no pé do aterro do talude.	38
Figura 15 – Representação da trinca de tração em um talude.	39
Figura 16 – Gráficos para distribuição do Fator de Segurança.	41
Figura 17 – Valores típicos de coeficiente de variação sugeridos por Sandroni e Sayão.	45
Figura 18 – Gráfico de Distribuição Normal.	45
Figura 19 – Índice de confiabilidade x probabilidade de ruptura.	47
Figura 20 – Níveis de aceitação de probabilidades de ruptura, de acordo com o US Army Corps of Engineers.	49
Figura 21 – Fatores de Segurança Mínimo Exigidos pela NBR 13028-2 atualizada.	51
Figura 22 – Classificação do Estado de Conservação.	53
Figura 23 – Métodos de Procedimentos para o desenvolvimento da pesquisa.	55
Figura 24 – Seção de estudo.	56
Figura 25 – Ensaio Triaxial CIUsat para as amostras realizadas para o Aterro 1.	60
Figura 26 – Ensaio Triaxial CIUsat para as amostras realizadas para o Aterro 2.	61
Figura 27 – Análise de Percolação para o modelo de cenário base.	65
Figura 28 – Análise de Percolação para o modelo de cenário 02.	66
Figura 29 – Análise de Percolação para o modelo de cenário 03.	67
Figura 30 – Modelo adotado para o cenário 04.	68
Figura 31 – Modelo adotado para o cenário 05.	69
Figura 32 – Resultado do Cenário 01.	75
Figura 33 – Resultado do Cenário 02.	74
Figura 34 – Resultado do Cenário 03.	75
Figura 35 – Resultado do Cenário 04.	77
Figura 36 – Resultado do Cenário 05.	78
Figura 37 – Interferência do ϕ do Aterro 1 no resultado do Cenário Base.	80
Figura 38 – Interferência do ϕ do Aterro 2 no resultado do Cenário Base.	80
Figura 39 – Interferência do ϕ do Aterro 1 no resultado do cenário mais crítico.	81

Figura 40 – Interferência do ϕ da Hematitinha no resultado do cenário mais crítico.	82
Figura 41 – Distribuição gráfica de todos os resultados das análises de estabilidade referente a cada cenário.	84
Figura 42 – Valores médios obtidos para cada cenário.	84
Figura 43 – Índice de Confiabilidade x Probabilidade de Ruptura.	85
Figura 44 – Fator de Segurança x Probabilidade de Ruptura	86
Figura 45 – Fator de Segurança x Índice de Confiabilidade.....	86

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de resistência utilizados no estudo.	58
Tabela 2 – Parâmetros de permeabilidade utilizados no estudo.	58
Tabela 3 – Resultados da Compilação do Ensaio Triaxial CIUsat do Aterro 1.....	59
Tabela 4 – Resultados da Compilação do Ensaio Triaxial CIUsat do Aterro 2.....	62
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos adotados.	64
Tabela 6 – Resultados da Análise Determinística para cada cenário simulado.	82
Tabela 7 – Resultados das Análises Probabilísticas para cada cenário simulado. ...	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas

2D: Bidimensional.

FS: Fator de Segurança.

NBR: Norma Brasileira.

ANM: Agência Nacional de Mineração.

3D: Tridimensional.

MEL: Métodos de Equilíbrio Limite.

ALARP: *As Low As Reasonably Practicable*.

ANCOLD: *Australian National Committee on Large Dams*.

CC: Coeficientes de Correlação.

CIUsat: Ensaios triaxiais consolidados isotopicamente e não drenados.

COV / CV: Coeficiente de Variação.

CRI: Categoria de Risco.

DCE: Declaração de Condição de Estabilidade.

DOS: Direction of Slide (Direção de escorregamento).

EIE: Relatório de Inspeção Especial.

EoR: Engenheiro de Registro.

FDP: Função de Distribuição de Probabilidade.

FEM / MEF: Finite Element Method / Método dos Elementos Finitos.

FIE: Ficha de Inspeção Especial.

ICOLD: *International Commission on Large Dams*.

ISE: Inspeção de Segurança Especial.

LEM: *Limit Equilibrium Method* (Método de Equilíbrio Limite).

MCS: Simulação de Monte Carlo.

Pf / Pr: Probabilidade de Ruptura ou Probabilidade de Falha.

PNSB: Política Nacional de Segurança de Barragens.

RI / β : Índice de Confiabilidade (*Reliability Index*).

RSM: Método da Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*).

T-D: Tensão-Deformação.

USACE: *U.S. Army Corps of Engineers*.

USBR: *United States Bureau of Reclamation*.

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ - Ângulo de atrito interno do solo (essencial para o critério de Mohr-Coulomb).

γ_v - Peso específico do solo ou do rejeito (natural, saturado ou submerso).

c - Coesão do solo (parâmetro de resistência mencionado no texto).

u - Poropressão (pressão da água nos vazios do solo).

FS - Fator de Segurança.

k - Permeabilidade (coeficiente de condutividade hidráulica).

z - Profundidade ou cota geométrica da seção transversal.

σ (ou p_0): Tensão normal ou pressão total.

σ' (ou p): Tensão efetiva.

τ : Resistência ao cisalhamento ou tensão cisalhante.

τ_{mob} : Tensão cisalhante mobilizada.

τ_r : Resistência ao cisalhamento mobilizada em termos efetivos.

c' : Coesão efetiva.

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo.

σ_1 : Carga vertical compressiva (tensão principal maior) no ensaio triaxial.

σ_3 : Pressão hidrostática confinante no ensaio triaxial.

X : Força de cisalhamento interlamelar (entre as fatias).

E : Força normal interlamelar (entre as fatias).

$f(x)$: Função arbitrária de distribuição das forças interlamelares.

λ : Fator de escala utilizado nos métodos de equilíbrio limite.

Q : Vazão da água.

i : Gradiente hidráulico.

A : Área da seção transversal.

H : Carga total a ser dissipada.

N_f : Número de canais de fluxo da rede.

N_q : Número de perdas de carga entre as linhas equipotenciais.

b : Largura ou espessura do filtro vertical.

k_{fv} : Permeabilidade do material do filtro.

D15 / D85: Diâmetros correspondentes às porcentagens de 15% e 85%, em peso, de partículas passantes na curva granulométrica.

Kv: Coeficiente de permeabilidade vertical.

Kh: Coeficiente de permeabilidade horizontal.

Ks: Coeficiente de permeabilidade saturada.

μ (ou $E[X]$): Média aritmética ou valor central esperado de uma propriedade.

σ : Desvio padrão (quando no contexto de dispersão de dados estatísticos).

CV (ou COV): Coeficiente de variação.

β (ou RI): Índice de Confiabilidade.

Pr (ou Pf): Probabilidade de Ruptura ou Falha.

$E[FS]$: Média do Fator de Segurança.

$\sigma[FS]$: Desvio padrão do Fator de Segurança.

FSiX: Fator de Segurança estimado no Método da Superfície de Resposta (RSM).

a_0 : Termo independente (intercepto) da função polinomial no RSM.

b_j / c_j : Coeficientes de regressão (linear e quadrático, respectivamente) no RSM.

R^2 : Coeficiente de determinação.

S: Passo estatístico (ou incremento) adotado na variação dos parâmetros.

CC: Coeficiente de Correlação Linear.

LISTA DE EQUAÇÕES

- (1) Lei de Darcy para cálculo da vazão de percolação da água através do solo.
- (2) Cálculo da vazão de água por metro de seção transversal da barragem a partir da rede de fluxo.
- (3) Cálculo da largura ou espessura do filtro vertical (chaminé).
- (4) Condição de retenção das partículas (proteção contra o processo de piping) pertencente ao Critério de Filtro de Terzaghi.
- (5) Condição de livre passagem da água pertencente ao Critério de Filtro de Terzaghi.
- (6) Equação fundamental da tensão efetiva para solos saturados.
- (7) Formulação clássica da teoria de Coulomb para o cálculo da resistência ao cisalhamento.
- (8) Princípio das Pressões Efetivas de Terzaghi.
- (9) Critério de Mohr-Coulomb em termos efetivos.
- (10) Equação do Fator de Segurança (FS) nos Métodos de Equilíbrio Limite.
- (11) Equação de aplicação do equilíbrio nas direções normal e paralela à base da fatia no Método de Spencer.
- (12) Função polinomial de segunda ordem do Método da Superfície de Resposta (RSM) para a estimativa do Fator de Segurança.
- (13) Equação do Coeficiente de Variação (CV).
- (14) Função de Distribuição de Probabilidade Normal (Gaussiana).
- (15) Cálculo do Índice de Confiabilidade (β).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Pergunta de pesquisa	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	Justificativa e relevância	15
1.4	Restrições e limitações da pesquisa	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Barragens de Terra e Percolação	18
2.1.1	Elementos constituintes	18
2.1.2	Análise de fluxo	20
2.1.3	Tensão efetiva e resistência ao cisalhamento	22
2.2	Estabilidade de Taludes e Equilíbrio Limite	27
2.2.1	Métodos de equilíbrio limite	27
2.2.2	Método de Morgenstern-Price	29
2.2.3	Método de Spencer	31
2.2.4	Método de Sarma	34
2.3	Anomalias Geotécnicas	35
2.3.1	Colmatção de sistemas drenantes	35
2.3.2	Surgências	37
2.3.3	Trincas de tração e descontinuidades geométricas	38
2.4	Análise de Confiabilidade e Probabilística	40
2.4.1	Incerteza e variabilidade geotécnica	40
2.4.2	Método de superfície de resposta	43
2.4.3	Distribuição de probabilidade	44
2.4.4	Índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura	46
2.5	Legislação e Normatização Brasileira	49
2.5.1	NBR 13028 (2024):	50
2.5.2	Panorama geral de resoluções da agência nacional de mineração (ANM):	52
3	METODOLOGIA	53
3.1	Método de abordagem	53
3.2	Método de procedimento	54

3.2.1	Definição da seção de estudo	56
3.2.2	Definição dos parâmetros determinísticos adotados.....	57
3.2.3	Definição dos parâmetros estatísticos adotados	64
3.2.4	Cenários simulados.....	65
3.2.5	Configuração da modelagem determinística (<i>Slide 2D</i>)	71
3.2.6	Configuração da modelagem probabilística (<i>Slide 2D</i>)	73
4	RESULTADOS	75
4.1	Análise Determinística e Probabilística	75
4.2	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros	83
4.3	Correlação dos Resultados	85
5	CONCLUSÃO	91
6	TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são estruturas de engenharia complexas que exigem avaliações rigorosas e contínuas de segurança. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024), o projeto e a operação dessas obras devem prever medidas criteriosas visando garantir a estabilidade física e hidráulica do maciço, a fim de prevenir falhas estruturais e mitigar severos danos ambientais e sociais.

Durante a sua vida útil operacional, essas estruturas estão sujeitas ao desenvolvimento de anomalias geotécnicas progressivas e acúmulo de patologias. De acordo com Massad (2010), a evolução de problemas operacionais altera de forma significativa o fluxo interno da barragem. Como consequência direta, ocorre a elevação das pressões neutras (poropressões) no interior do maciço, fenômeno que reduz a tensão efetiva e, conseqüentemente, diminui a resistência ao cisalhamento do solo, conduzindo a estrutura a cenários críticos. Adicionalmente, conforme elucida Ferreira (2024), processos dinâmicos como a propagação de fissuras e trincas no solo tendem a agravar a perda progressiva de resistência, piorando a condição de suporte do maciço com o passar do tempo.

Historicamente, a avaliação da estabilidade de taludes em obras de terra tem se fundamentado nos métodos determinísticos de Equilíbrio Limite, a exemplo dos métodos de Morgenstern-Price, Sarma e Spencer. Entretanto, Massad (2010) esclarece que essa abordagem clássica avalia a condição da estrutura por meio de um Fator de Segurança (FS) único, ancorando-se na premissa de que o solo atua como um material rígido-plástico. Por conseguinte, o autor ressalta que esse modelo determinístico apresenta a severa limitação de ignorar eventuais dinâmicas de ruptura progressiva.

Para transpor as limitações dos métodos determinísticos diante do avanço de patologias cumulativas e das incertezas dos parâmetros geotécnicos, a literatura aponta para a necessidade de metodologias complementares. Sob essa ótica, Zhong, Sun e Li (2011) argumentam que a avaliação tradicional baseada exclusivamente em um Fator de Segurança é subjetiva, pois falha em refletir as condições variáveis do sistema. Os autores defendem que a incorporação da análise probabilística é uma evolução indispensável. A utilização de uma estrutura de probabilidades, segundo os pesquisadores, permite lidar de forma mais sistemática e lógica com as incertezas

inerentes aos modelos geotécnicos, identificando sua influência na confiabilidade da estrutura.

Diante do desafio de compreender como as obras de terra reagem à degradação crônica, este trabalho apresenta a avaliação da estabilidade de uma barragem de terra frente ao desenvolvimento de anomalias geotécnicas progressivas.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

Frente ao exposto, este trabalho busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: Qual a incerteza do Fator de Segurança (FS) de uma barragem de terra considerando acúmulo de patologias geotécnicas progressivas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a sensibilidade da estabilidade de uma barragem de terra diante do surgimento e acúmulo de anomalias geotécnicas progressivas, comparando os resultados das análises determinística e probabilística para quantificar a variação da segurança e do risco de ruptura da estrutura.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Adotar parâmetros geotécnicos dos solos e materiais constituintes a partir de estudos e relatórios técnicos anteriores, estabelecendo a base de dados necessária para as modelagens, visto que a caracterização por meio de ensaios de laboratório não integra o escopo desta pesquisa.
- Modelar a geometria e o comportamento hidráulico de uma seção transversal representativa no *software Slide2D*, estabelecendo o (1) cenário de operação normal da barragem como linha de base para as análises.
- Simular a evolução das patologias operacionais por meio de quatro cenários de degradação progressiva acumulada: (2) dreno colmatado; (3) dreno colmatado associado à surgência; (4) dreno colmatado, surgência e trinca saturada; e (5) dreno colmatado, surgência, trinca saturada e cunha localizada.

- Determinar o Fator de Segurança (FS) para cada um dos cinco cenários simulados por meio dos métodos de equilíbrio limite (Morgenstern-Price, Sarma e Spencer).
- Quantificar a confiabilidade e a probabilidade de ruptura (P_f) através do Método da Superfície de Resposta (Response Surface) com distribuição normal, processando os métodos de Morgenstern-Price e Spencer para absorver a variabilidade dos parâmetros adotados.
- Verificar a conformidade da estrutura frente aos requisitos mínimos de segurança estabelecidos pela ABNT NBR 13028:2024 (Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos).

Para fins de delimitação do escopo, esclarece-se que a caracterização laboratorial detalhada e os procedimentos de obtenção e tratamento estatístico dos parâmetros geotécnicos de cada material não fazem parte dos objetivos desta pesquisa. O trabalho assume os parâmetros já consolidados como dados de entrada (inputs), direcionando o foco analítico estritamente para a modelagem computacional, simulação de fluxo e avaliação dos critérios de estabilidade da estrutura.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A segurança de barragens de terra é um tema de importância crítica, dada a magnitude das consequências associadas a eventuais falhas. A justificativa deste trabalho reside na necessidade de compreender como anomalias operacionais — muitas vezes tratadas de forma isolada — interagem de maneira progressiva, comprometendo a estabilidade estrutural. A abordagem tradicional de Equilíbrio Limite, embora consolidada, oferece uma visão determinística que pode ser insuficiente frente à variabilidade dos parâmetros geotécnicos, especialmente em cenários onde a ausência de ensaios laboratoriais recentes impõe o uso de dados históricos.

A relevância deste estudo manifesta-se na integração entre a prática normativa brasileira (NBR 13028 e resoluções da ANM) e métodos avançados de análise de confiabilidade. Ao quantificar a probabilidade de ruptura em cenários evolutivos, a pesquisa fornece subsídios técnicos para a avaliação de risco, permitindo identificar o gatilho crítico de instabilidade. Academicamente, o trabalho demonstra a eficácia do método Response Surface na tradução de incertezas em indicadores estatísticos,

enquanto, no âmbito profissional, reforça a importância do monitoramento contínuo para evitar que patologias iniciais evoluam para estados de ruptura.

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Este estudo delimita-se à avaliação numérica e estatística da estabilidade de taludes de uma seção transversal de barragem de terra sob condições controladas de fluxo e geometria. Dessa forma, devem ser consideradas as seguintes restrições e limitações de escopo:

- Origem dos Parâmetros Geotécnicos: Esta pesquisa não contempla a execução de novos ensaios de laboratório ou de campo. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) e de condutividade hidráulica adotados nas modelagens foram obtidos a partir de ensaios de laboratório realizados em estudos anteriores específicos para a estrutura em análise, assumindo-se a validade e a consistência técnica desses dados históricos.
- Especificidade do Objeto de Estudo: As análises, resultados e conclusões obtidos neste trabalho referem-se estritamente à barragem específica adotada como objeto de estudo. Devido às particularidades de sua geometria, método construtivo e características dos materiais constituintes, os comportamentos observados não devem ser extrapolados genericamente para outras estruturas de terra.
- Caráter Hipotético dos Cenários: Embora fundamentados na geometria de uma estrutura real, os cenários de degradação progressiva simulados (Cenários 2 a 5), bem como as alterações induzidas no nível do reservatório, possuem finalidade estritamente acadêmica de análise de sensibilidade paramétrica. Portanto, os resultados não representam um laudo técnico ou a condição operacional atual do ativo.
- Simplificação Bidimensional (2D): As análises de estabilidade e de fluxo foram restritas a uma modelagem bidimensional por meio do *software Slide2D*. Esta abordagem desconsidera os efeitos tridimensionais de extremidade, a geometria do vale e as variações longitudinais que podem influenciar o comportamento real da estrutura.

- Método de Cálculo (Equilíbrio Limite): As análises determinísticas e probabilísticas fundamentam-se exclusivamente no Método de Equilíbrio Limite (LEM). Esse método avalia as condições de equilíbrio de um corpo rígido ao longo de uma superfície potencial de ruptura, não permitindo a avaliação de tensões-deformações, recalques, deslocamentos ou o histórico de carregamento do maciço, características que demandariam análises via Método dos Elementos Finitos (MEF).
- Simplificação Estatística: O tratamento das incertezas geológicas limitou-se ao uso de premissas estatísticas simplificadas, não incorporando correlações espaciais complexas ou múltiplas distribuições para descrever a variabilidade natural dos solos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BARRAGENS DE TERRA E PERCOLAÇÃO

De acordo com a ABNT NBR 13028 (2024), as barragens de mineração compreendem estruturas como barramentos e diques projetados especificamente para a contenção, acumulação ou decantação de rejeitos e sedimentos provenientes do beneficiamento mineral. Segundo Massad (2010), as barragens de terra, sejam elas homogêneas ou zoneadas, devem atender a requisitos rigorosos de estabilidade para evitar falhas catastróficas. O autor ressalta que um dos problemas que mais preocupam os projetistas é o fenômeno da erosão interna, que está diretamente ligado ao descontrole da passagem da água por dentro da estrutura.

2.1.1 Elementos constituintes

Para compreender como a água se move no interior do maciço de uma barragem, a geotecnia utiliza uma ferramenta visual e matemática. Conforme explica Massad (2010), o caminho que a água percorre através de um meio poroso saturado é estudado por meio do traçado de uma "rede de fluxo". Esta rede é constituída por duas famílias de curvas: as linhas de fluxo (que representam o trajeto real das gotas de água) e as linhas equipotenciais (o lugar geométrico dos pontos que possuem a mesma carga ou energia disponível para o escoamento).

O comportamento dessa água em movimento é regido pela Lei de Darcy. Segundo Caputo (1988), essa lei estabelece que a velocidade (ou vazão) de percolação da água através de um solo é diretamente proporcional à perda de carga ao longo da distância, ou seja, ao gradiente hidráulico. A vazão pode ser expressa pela clássica fórmula:

$$Q = kiA \quad (1)$$

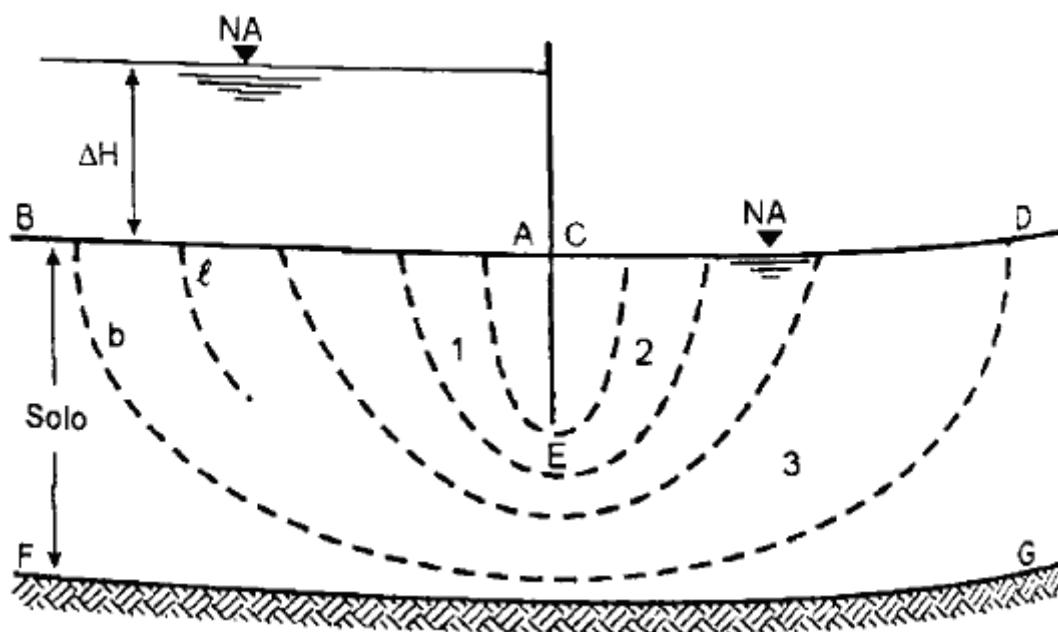
onde: Q é a vazão da água; k é o coeficiente de permeabilidade do solo; i é o gradiente hidráulico; e A é a área da seção transversal, segundo Caputo, 1988.

A partir do momento em que a rede de fluxo é desenhada, Massad (2010) demonstra que a vazão de água (Q) por metro de seção transversal da barragem pode ser facilmente calculada através de uma relação de forma da própria malha gráfica traçada:

$$Q = kH\left(\frac{N_f}{N_q}\right) \quad (2)$$

onde: H é a carga total a ser dissipada; n_f é o número de canais de fluxo; e n_q é o número de perdas de carga entre as equipotenciais, de acordo com Massad, 2010.

Figura 1 – Fluxo confinado bidimensional.



Fonte: Massad (2010).

O dimensionamento e a presença de um sistema de drenagem interna adequado têm impacto direto e crucial na estabilidade física do maciço. Conforme apontam Amieur et al. (2023), a infiltração descontrolada de água através da barragem pode ser altamente prejudicial, levando à erosão, à liquefação do solo e, em última instância, à ruptura da estrutura.

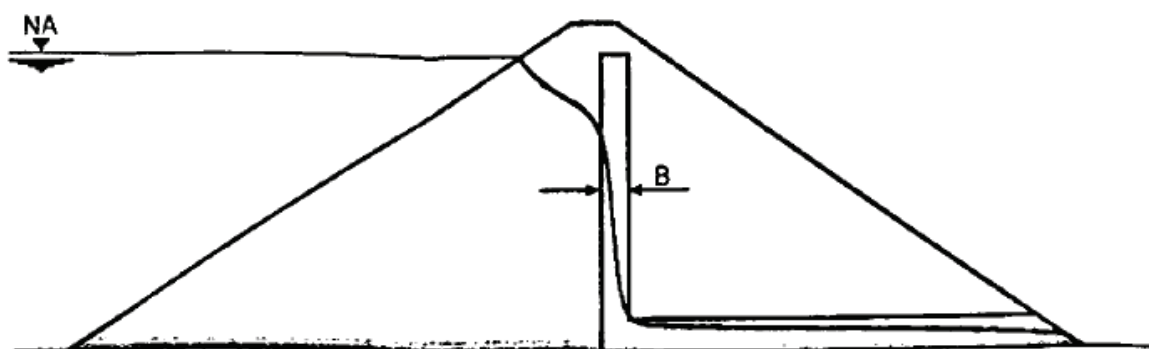
O sistema de drenagem atua não apenas interceptando e coletando a água, mas é fundamental para a dissipação e redução das pressões neutras (poropressões) geradas no interior da barragem ou em sua fundação. Altas pressões neutras são perigosas porque reduzem a resistência ao cisalhamento (resistência ao corte) do solo, o que pode desencadear o colapso por deslizamento do talude. Os autores demonstram, por exemplo, que o aumento do comprimento do dreno horizontal melhora significativamente a capacidade de drenagem, permitindo uma melhor dissipação das pressões da água nos poros, ajudando assim a reduzir o risco de acúmulo de pressões excessivas que levariam à perda de estabilidade e ao escorregamento do maciço.

2.1.2 Análise de fluxo

A análise detalhada da rede de fluxo é fundamental porque ela prevê onde a água tenderá a aflorar na face da barragem. Segundo Massad (2010), se a água emergir na face do talude de jusante (parte de trás da barragem), a estrutura fica suscetível ao piping (erosão regressiva tubular), um processo onde as partículas do solo são lavadas pela água, formando cavidades que levam a barragem ao colapso.

Para solucionar esse problema, a engenharia precisou interceptar as linhas de fluxo antes que elas atingissem o talude externo, introduzindo o sistema de drenagem interna, composto principalmente por filtros verticais (chaminé) ou inclinados e filtros horizontais (tapetes drenantes). Estudos experimentais recentes confirmam que a localização exata e a geometria do dreno vertical são fatores cruciais para rebaixar a superfície freática e garantir a estabilidade do talude de jusante (DJEHICHE; AMIEUR; GAFSI, 2014 apud AMIEUR et al., 2023).

Figura 2 – Filtro vertical.



Fonte: Massad (2010).

Ao dimensionar a espessura (b) necessária para um filtro vertical absorver todo o fluxo de água interceptado, Massad (2010) deduz da Lei de Darcy uma equação prática que relaciona a vazão absorvida com a permeabilidade do dreno:

$$b = \frac{Q}{k_{fv}} \quad (3)$$

onde: b é a largura ou espessura do filtro vertical; Q é a vazão absorvida; e k_{fv} é a permeabilidade do material do filtro.

A literatura contemporânea tem expandido essas abordagens de projeto. De acordo com a revisão conduzida por Madhloom et al. (2025), as metodologias mais recentes para o controle de percolação dividem-se em modificações geométricas, uso

de materiais alternativos (como a adição de pó de pneu de borracha para reduzir a condutividade hidráulica), e a aplicação de aditivos químicos (nano-argilas e misturas estabilizantes) no núcleo.

Apesar de todas essas inovações, para que os drenos permitam a livre passagem da água sem deixar que o solo seja arrastado junto, a escolha da granulometria exata do material granular ainda deve garantir o rigoroso Critério de Filtro de Terzaghi (MASSAD, 2010), que estabelece as seguintes condições matemáticas:

I. Condição de retenção das partículas (proteção contra o piping):

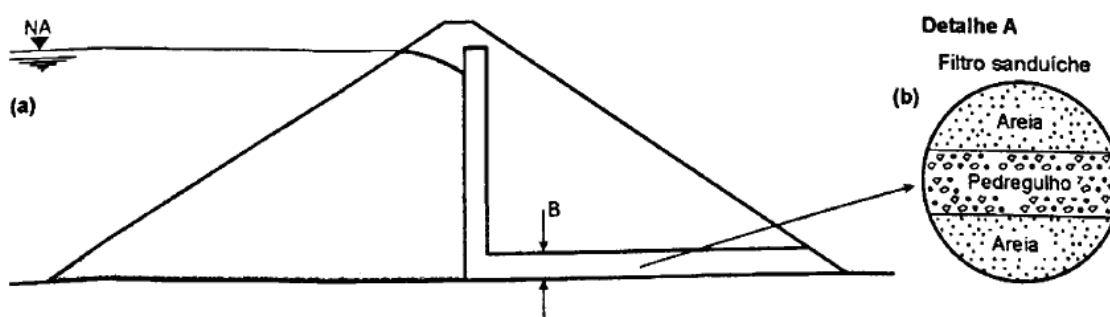
$$\frac{D_{15}(\text{Filtro})}{D_{85}(\text{Solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (4)$$

II. Condição de livre passagem da água (permeabilidade adequada):

$$\frac{D_{15}(\text{Filtro})}{D_{15}(\text{Solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (5)$$

onde os índices 15 e 85 referem-se à porcentagem, em peso, de partículas menores do que o respectivo diâmetro correspondente na curva granulométrica.

Figura 3 – Filtro horizontal tipo "sanduíche".



Fonte: Massad (2010).

A determinação exata dos coeficientes de permeabilidade é uma exigência normativa fundamental para as análises estruturais e de percolação que garantem a segurança de barragens (ABNT NBR 13028, 2024). Na prática da engenharia, o ensaio de permeabilidade é a ferramenta utilizada para a calibração dos coeficientes hidráulicos de uma seção, permitindo ajustar os modelos matemáticos teóricos ao comportamento físico real dos materiais empregados no maciço.

A eficácia dessa calibração empírica é categoricamente comprovada pelo estudo de Alzamily e Abed (2022), que investigaram a redução de percolação em barragens de terra zoneadas. Para calibrar o coeficiente de permeabilidade das

diferentes seções, os autores construíram um modelo físico experimental em uma caixa de vidro (na escala 1:25). Medindo a quantidade de água coletada (por exemplo, ao longo de intervalos de 10 minutos), os pesquisadores determinaram na prática o coeficiente de permeabilidade (k) para diversos tipos de solo (como as Areias A, B e C) em diferentes graus de saturação.

O ensaio permitiu comprovar e calibrar com precisão o ganho de eficiência hidráulica na seção quando o solo padrão recebeu porcentagens de aditivos (como pó de forno de cimento), evidenciando reduções substanciais na condutividade hidráulica. Isso atesta que o dimensionamento seguro de zonas impermeáveis e sistemas de drenagem depende estritamente da calibração laboratorial ou em modelos físicos fornecida pelo ensaio de permeabilidade.

2.1.3 Tensão efetiva e resistência ao cisalhamento

Na mecânica dos solos, o Princípio das Tensões Efetivas, formulado por Karl Terzaghi após intensa verificação experimental, é um conceito fundamental para o entendimento do comportamento dos maciços terrosos. Segundo Pinto (2006), a tensão normal total aplicada em qualquer plano de um solo saturado é dividida em duas parcelas: a tensão efetiva, que é a tensão transmitida diretamente pelos contatos entre as partículas sólidas, e a pressão neutra (ou poro-pressão), que é a pressão exercida pela água no interior dos vazios do solo.

A partir dessa constatação, a tensão efetiva para solos saturados é expressa pela seguinte equação fundamental:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (6)$$

onde: σ' = tensão efetiva; σ = tensão total; u = pressão neutra (poro-pressão).

O entendimento e o cálculo desta grandeza são indispensáveis em projetos geotécnicos, pois a tensão efetiva é a verdadeira responsável pelo comportamento mecânico do solo. Conforme destaca Pinto (2006), todos os efeitos mensuráveis resultantes do carregamento de um solo, como a compressão, a distorção e as variações na resistência ao cisalhamento, não dependem das tensões totais, mas são decorrentes exclusivamente das variações das tensões efetivas.

A estabilidade de um maciço terroso contra rupturas é governada pela sua capacidade de resistência ao cisalhamento. A primeira formulação matemática rigorosa sobre o comportamento quantitativo dos solos foi estabelecida pela teoria de Coulomb. Conforme ensina o livro de Caputo (1988), esta teoria clássica determina

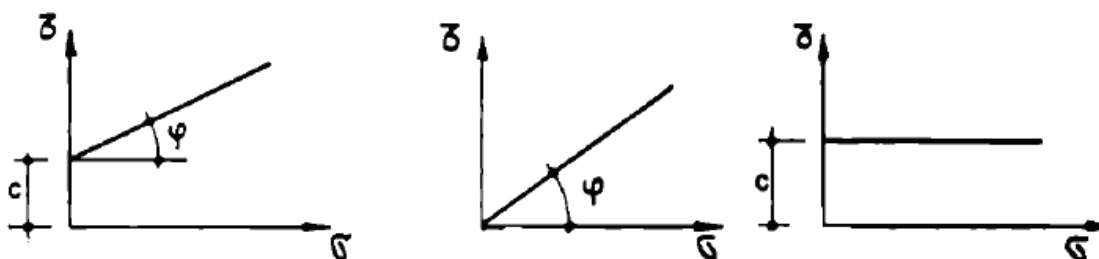
que a resistência é composta basicamente pelo atrito interno gerado entre as partículas e pela coesão do material, sendo expressa pela seguinte equação fundamental:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (7)$$

onde: τ é a resistência ao cisalhamento; c é a coesão do solo; σ é a tensão normal; e ϕ é o ângulo de atrito interno, conforme descrito em CAPUTO, 1988.

Para visualizar matematicamente essa relação, a resistência do solo pode ser plotada em um gráfico cartesiano. Essa representação gráfica ilustra a equação de Coulomb como uma reta, evidenciando o intercepto da coesão (c) no eixo das ordenadas e a inclinação da reta definida pelo ângulo de atrito (ϕ). Essa "curva intrínseca" ou reta atua como uma fronteira: ela separa a zona inferior, onde o equilíbrio das tensões no solo é estável, da zona superior, onde o solo entra em fase de ruptura.

Figura 4 – Gráfico da Envoltória de Coulomb ilustrando a reta com intercepto c e inclinação ϕ , separando a zona estável da zona de ruptura.



Fonte: Caputo (1988).

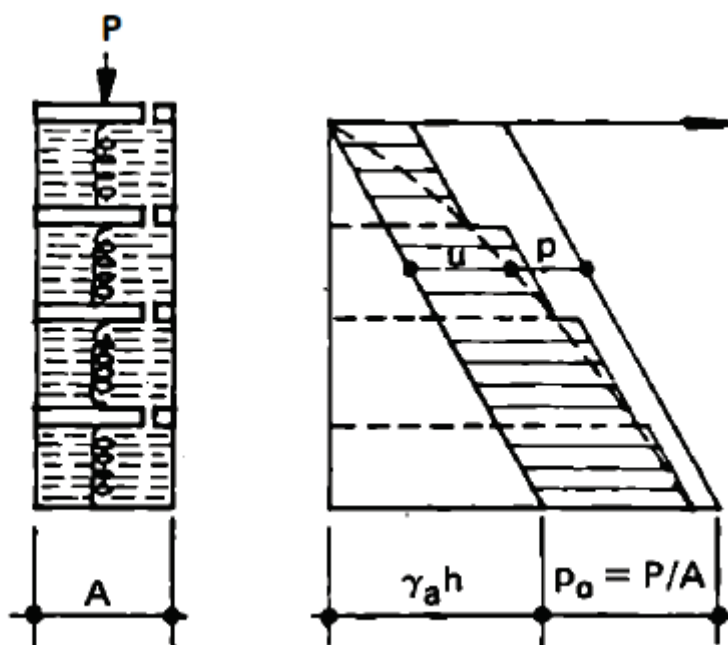
Contudo, para avaliar com precisão o comportamento mecânico dos solos quando os seus vazios contêm água, foi imprescindível a introdução do Princípio das Pressões Efetivas, descoberto e originalmente proposto pelo famoso cientista Karl Terzaghi. Conforme relata Caputo (1988), Terzaghi demonstrou de forma pioneira que a pressão total (p_0 ou σ) aplicada sobre o solo saturado é suportada por duas fases distintas atuando em conjunto: a pressão absorvida pela água nos vazios, denominada pressão neutra ou sobrepressão hidrostática (u), e a pressão suportada diretamente pelo contato mecânico entre os grãos sólidos, denominada tensão efetiva (p ou σ'). A relação universal descoberta por Terzaghi é definida pela equação:

$$p = p_0 \text{ ou } \sigma' = \sigma - u \quad (8)$$

onde: p ou σ' é a tensão efetiva; p_0 ou σ é a pressão total; e u é a pressão neutra, equação citada em CAPUTO, 1988.

A fim de explicar o mecanismo físico de como ocorre essa transferência de pressões da água para os grãos de solo, a geotecnia utiliza a famosa "Analogia Mecânica de Terzaghi". Nesse modelo físico clássico, o esqueleto sólido do solo é representado por uma mola dentro de um cilindro, enquanto a água preenche os espaços vazios (os furos nos êmbolos). À medida que a água escapa ou é drenada pelos furos, a pressão que inicialmente estava na água (pressão neutra) é gradativamente transferida para a mola (tensão efetiva), que se comprime de fato e mobiliza a resistência do conjunto estrutural.

Figura 5 – Esquema da Analogia de Terzaghi ilustrando o cilindro com a mola (esqueleto sólido) e a água (vazios), demonstrando a transferência de carga.



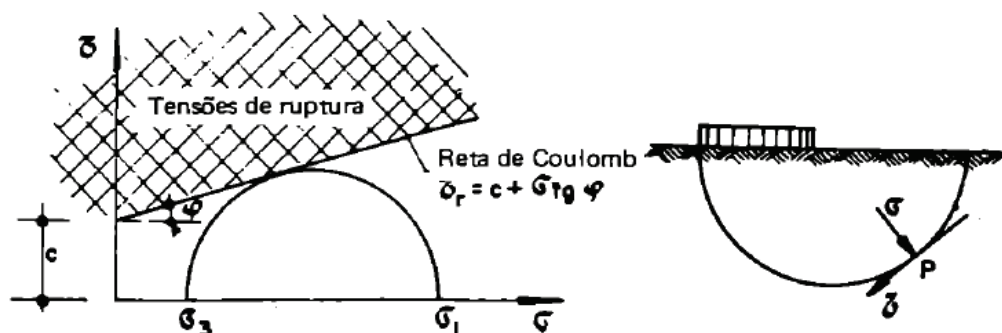
Fonte: Caputo (1988).

Gerscovich (2016) ressalta que as análises feitas em termos de pressões efetivas são teoricamente as mais corretas. Devido a essa comprovação geomecânica, a equação original de Coulomb precisou ser ajustada para incorporar o efeito da pressão neutra da água, uma vez que apenas as pressões efetivas (a pressão nas "molas") são capazes de mobilizar o atrito interno real do material. Surge então a forma modificada da equação (consagrada na literatura como Critério de Mohr-Coulomb em termos efetivos), que incorpora os parâmetros efetivos de resistência (c' e ϕ') para refletir a resistência mobilizada com precisão:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \phi' \quad (9)$$

onde: τ_r é a resistência ao cisalhamento; c' é a coesão efetiva; e ϕ' é o ângulo de atrito efetivo, segundo a compilação de CAPUTO, 1988.

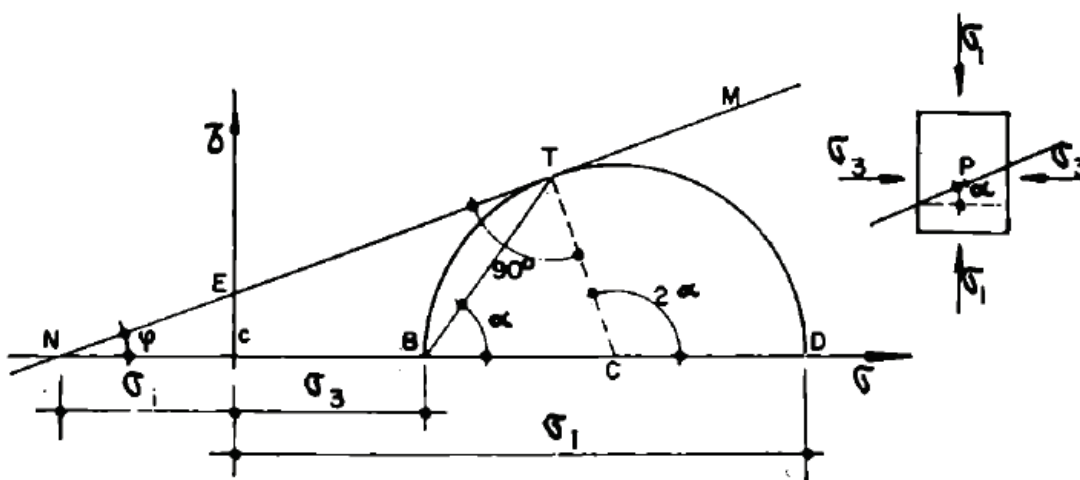
Figura 6 – Tensões de ruptura, Reta de Coulomb e Círculo de Mohr.



Fonte: Caputo (1988).

O impacto prático dessa correção matemática é perfeitamente visualizado na junção geométrica do estado de tensões com o critério de ruptura. No diagrama de Mohr, o estado de tensões de um ponto no solo é representado por um círculo. Quando o círculo representativo das tensões (já descontada a pressão da água) tangencia exatamente a envoltória de resistência (a reta de Coulomb com os parâmetros efetivos), atinge-se o chamado estado de equilíbrio plástico, indicando visualmente que a tensão de cisalhamento se igualou à resistência e a ruptura do material é iminente naquele plano de falha.

Figura 7 – Critério de Mohr Coulomb, com o círculo de tensões tangenciando a envoltória de resistência no ponto de ruptura.

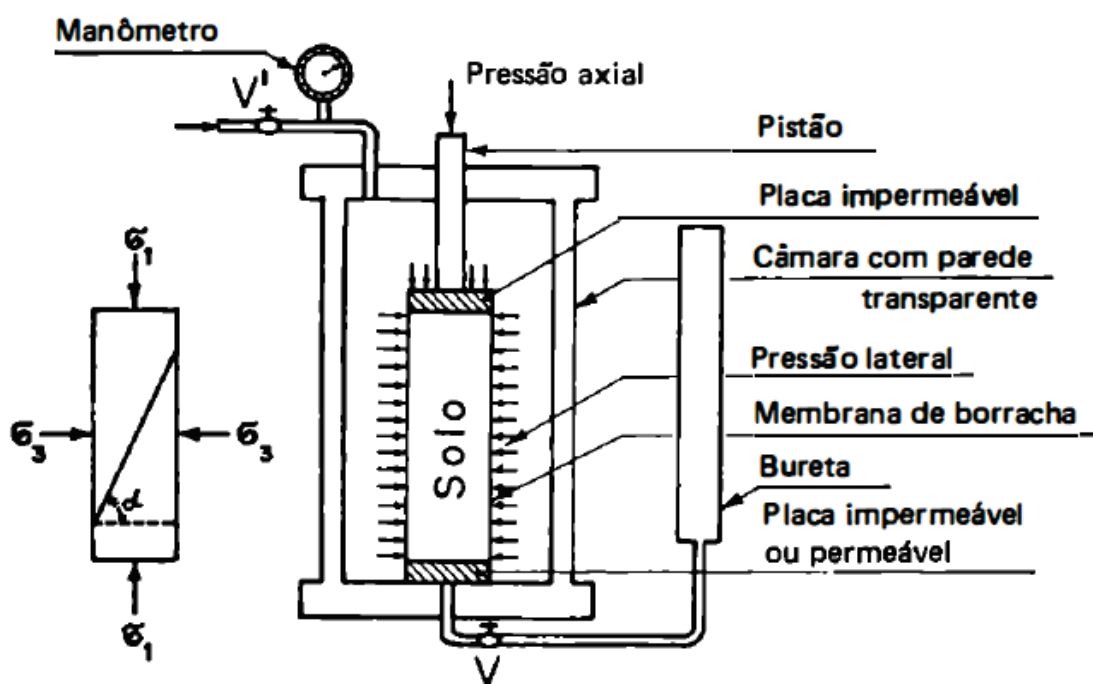


Fonte: Caputo (1988).

Como continuação direta dos conceitos de resistência ao cisalhamento, a obtenção precisa dos parâmetros efetivos de resistência (c' e ϕ') é indispensável para as análises de estabilidade (GERSCOVICH, 2016). Neste contexto, a literatura clássica aponta o ensaio de compressão triaxial como o método laboratorial mais confiável e completo, superando amplamente as limitações do ensaio de cisalhamento direto (CAPUTO, 1988).

O ensaio consiste em confinar um corpo de prova sob uma pressão hidrostática (σ_3), simulando as tensões reais de confinamento no campo, e em seguida aplicar uma carga vertical compressiva até a ruptura (σ_1) (CAPUTO, 1988). A diferença matemática entre essas pressões principais é denominada "tensão desviadora" ($\sigma_1 - \sigma_3$) (CAPUTO, 1988).

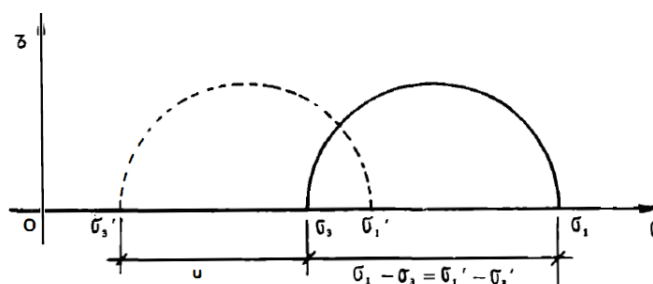
Figura 8 – Esquema do aparelho de Compressão Triaxial, contendo a câmara, a membrana de borracha confinante e o pistão vertical de carga.



Fonte: Caputo (1988).

Diferente de outros métodos, o triaxial revela todo o percurso de tensão-deformação do material sob condições controladas de drenagem (CAPUTO, 1988). A partir de ensaios com diferentes pressões confinantes, traçam-se os Círculos de Mohr e a Envoltória de Ruptura tangente a eles; é a partir da inclinação e do intercepto dessa envoltória gráfica que se extraem diretamente o ângulo de atrito efetivo (ϕ') e a coesão efetiva (c'), respectivamente (CAPUTO, 1988). Esses parâmetros são fundamentais para o cálculo da resistência mobilizada, conforme Equação 8.

Figura 9 – Diagrama com os Círculos de Mohr gerados a partir do ensaio triaxial, tangenciados pela Envoltória de Resistência, evidenciando a extração gráfica de c e ϕ .



Fonte: Caputo (1988).

A superioridade técnica do ensaio triaxial para capturar a complexidade geomecânica é comprovada na pesquisa de Zhang et al. (2026), que investigou a estabilidade de misturas de solo e rocha oriundas de pilhas de estéril. Estes autores justificam a escolha do triaxial exatamente por ele evitar a geração de "planos de falha predeterminados" e "concentrações de tensões" induzidas de forma irreal, falhas típicas do ensaio de cisalhamento direto (ZHANG et al., 2026).

Ao aplicar pressões confinantes crescentes que simulam o peso do maciço (de 100 a 400 kPa), o estudo conseguiu ir muito além da simples extração de c' e ϕ' (ZHANG et al., 2026). Os resultados do ensaio triaxial permitiram aos autores comprovar e registrar o fenômeno de "endurecimento por deformação" (strain-hardening), demonstrando que a mistura ganha resistência mecânica continuamente à medida que se deforma (ZHANG et al., 2026).

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES E EQUILÍBRIO LIMITE

A verificação da segurança de uma barragem passa, necessariamente, pela análise da estabilidade de seus taludes frente aos esforços de cisalhamento. Embora existam diversas metodologias de cálculo disponíveis na literatura, este capítulo concentra-se nos métodos de equilíbrio limite adotados ao longo deste trabalho. Tais métodos foram selecionados por permitirem uma análise robusta do Fator de Segurança sob diferentes estados de tensões, fundamentando os critérios de estabilidade da seção estudada.

2.2.1 Métodos de equilíbrio limite

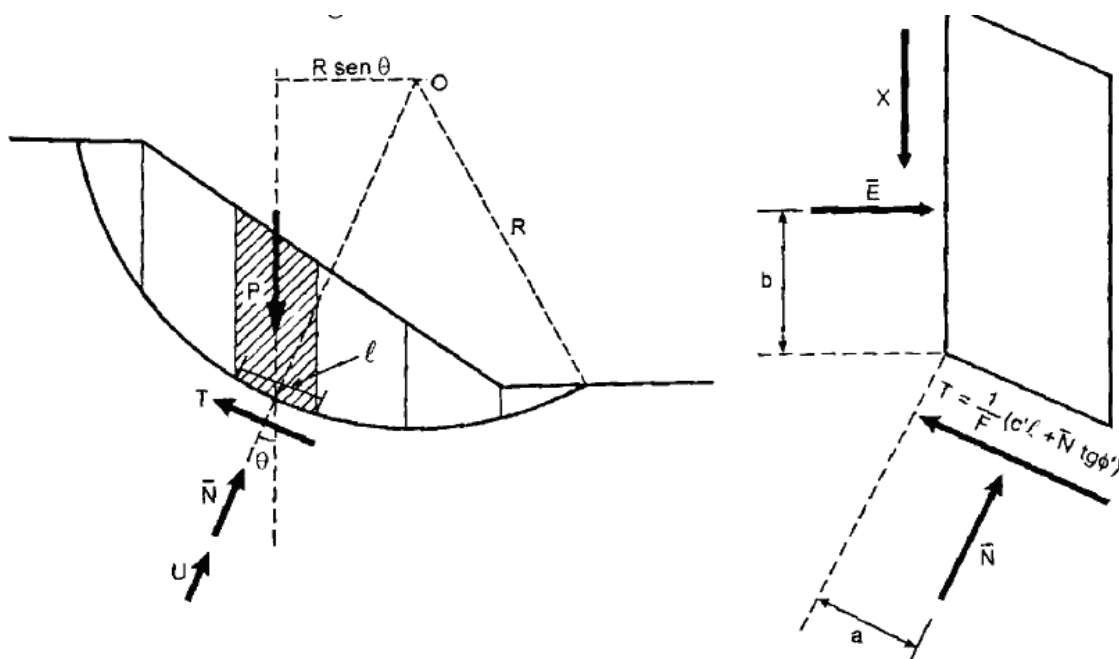
Na geotecnia, a estabilidade de taludes é avaliada pelos Métodos de Equilíbrio Limite, que se apoiam em três pressupostos básicos: o solo comporta-se como um material rígido-plástico; as equações da Estática são válidas até o exato instante da

iminência da ruptura; e o Fator de Segurança (FS) é constante em toda a superfície de escorregamento (MASSAD, 2010). A análise consiste em comparar as forças instabilizadoras com a capacidade resistente do maciço, onde o Fator de Segurança é a relação entre a resistência ao cisalhamento disponível (τ) e a tensão cisalhante mobilizada (τ_{mob}) necessária para manter o equilíbrio, conforme a equação abaixo (GERSCOVICH, 2016):

$$FS = \frac{\tau}{\tau_{mob}} \quad (10)$$

Como as rupturas reais apresentam formas geométricas complexas e heterogêneas, a massa de solo instável é subdividida em colunas verticais, procedimento consagrado como "Método das Fatias" (MASSAD, 2010). O grande desafio físico dessa divisão é que ela torna o problema estaticamente indeterminado: as incógnitas geradas — especialmente as forças de empuxo atuantes nas faces verticais entre uma lamela e outra (forças interlamelares) — superam o número de equações da estática disponíveis para a solução.

Figura 10 – Fatias subdivididas na cunha de ruptura e forças atuantes em cada lamela.



Fonte: Caputo (1988).

Para viabilizar a resolução matemática, a engenharia adota hipóteses simplificadoras sobre a direção e aplicação dessas forças interlamelares, o que dá origem aos diversos métodos de cálculo existentes (MASSAD, 2010).

Abordagens mais simples (como as de Fellenius, Bishop Simplificado e Janbu) optam por não satisfazer a todas as equações de equilíbrio estático. No entanto, para

análises rigorosas de estabilidade — especialmente em geometrias complexas e superfícies não circulares —, utilizam-se métodos completos como o de Morgenstern-Price, Sarma e Spencer (GERSCOVICH, 2016). Estes métodos satisfazem integralmente a todas as equações da estática (somatório de forças e momentos), mas a sua alta complexidade iterativa torna obrigatório o emprego de programas de computador para a resolução.

2.2.2 Método de Morgenstern-Price

O método desenvolvido por Morgenstern e Price (1965) é classificado na engenharia geotécnica como uma das abordagens de equilíbrio limite mais completas e rigorosas para a análise de estabilidade de taludes. Conforme explica Gerscovich (2016), a grande vantagem dessa formulação reside no fato de que ela satisfaz integralmente a todas as três equações de equilíbrio da Estática — ou seja, garante o equilíbrio de forças horizontais, verticais e de momentos para toda a massa de solo instável, adaptando-se a superfícies de ruptura de qualquer formato.

No que tange à formulação matemática para resolver a severa indeterminação estática gerada pela divisão em fatias, Cheng e Lau (2008) detalham que o método estabelece uma relação rigorosa e diferenciada para as forças interlamelares (as forças que atuam nas faces verticais entre uma lamela e outra). Ao invés de assumir uma direção geométrica fixa, a força de cisalhamento interlamelar (X) é matematicamente associada à força normal (E) por meio de uma função arbitrária denotada por $f(x)$, multiplicada por um fator de escala escalar λ (CHENG; LAU, 2008).

Essa flexibilidade permite que o projetista (ou o *software*) adote diferentes tipos de funções de distribuição para essas forças (como constante, senoidal, trapezoidal, etc.) ao longo do comprimento da massa instável (CHENG; LAU, 2008). A título de fundamentação teórica, Cheng e Lau (2008) ressaltam que, quando se assume a função $f(x)$ igual a 1,0 (uma relação perfeitamente constante ao longo de todas as lamelas), o método de Morgenstern-Price reduz-se e torna-se estritamente equivalente ao Método de Spencer.

tradicionalmente aplicado em duas dimensões (2D), o rigor dessa metodologia impulsionou sua adaptação para análises tridimensionais (3D) de estabilidade de encostas.

Na revisão detalhada sobre o estado da arte na área conduzida por Kumar, Choudhary e Burman (2023), destaca-se que a primeira extensão histórica da formulação de Morgenstern-Price para o ambiente 3D foi realizada por Anagnosti (1969). Diferentemente do cenário 2D, onde a direção de escorregamento é óbvia, na análise 3D a direção crítica de deslizamento pode variar substancialmente dependendo da geometria e dos carregamentos assimétricos do talude (KUMAR; CHOUDHARY; BURMAN, 2023).

A resolução desse método em 3D amplia exponencialmente o número de equações e incógnitas, o que historicamente causou severos problemas de convergência numérica. Contudo, Kumar, Choudhary e Burman (2023) relatam que estudos recentes conseguiram contornar essa dificuldade implementando o método de Morgenstern-Price com o auxílio de algoritmos de otimização global. Os autores citam, por exemplo, o trabalho de Cheng e Yip (2007), que adaptaram com sucesso a teoria de Morgenstern-Price para avaliar problemas não simétricos em 3D, empregando rotinas iterativas complexas para determinar simultaneamente o fator de segurança mínimo e a direção única de deslizamento (KUMAR; CHOUDHARY; BURMAN, 2023).

Adicionalmente, abordagens inovadoras como a proposta por Sun et al. (2012) expandiram ainda mais a aplicabilidade do método de Morgenstern-Price em 3D. Conforme apontam Kumar, Choudhary e Burman (2023), esses pesquisadores combinaram as formulações de equilíbrio limite com uma malha triangular ao longo da projeção da superfície de ruptura. Essa técnica permitiu resolver o problema em formato de otimização matemática rigorosa, estabelecendo todos os equilíbrios de força e momento sem a necessidade de fragmentar o maciço em colunas clássicas, resultando em precisão muito superior na obtenção do Fator de Segurança para maciços de geometria altamente complexa.

2.2.3 Método de Spencer

O método proposto originalmente por Spencer (1967) enquadra-se na categoria dos métodos rigorosos de equilíbrio limite para a avaliação da estabilidade de taludes. Assim como a formulação de Morgenstern-Price, a grande vantagem desta

metodologia é que ela satisfaz integralmente a todas as três equações da estática: garante o equilíbrio de forças horizontais, verticais e o equilíbrio global de momentos para a massa de solo instável (GERSCOVICH, 2016).

A característica fundamental que distingue o método de Spencer é a sua hipótese simplificadora para a resolução da severa indeterminação estática gerada pela divisão do maciço em fatias. Cheng e Lau (2008) explicam que o método assume que as resultantes das chamadas forças interlamelares (as forças normais e de cisalhamento atuantes nas faces verticais entre as lamelas) são estritamente paralelas entre si. Isso significa que o ângulo de inclinação dessas forças laterais é considerado constante ao longo de toda a extensão da superfície potencial de ruptura.

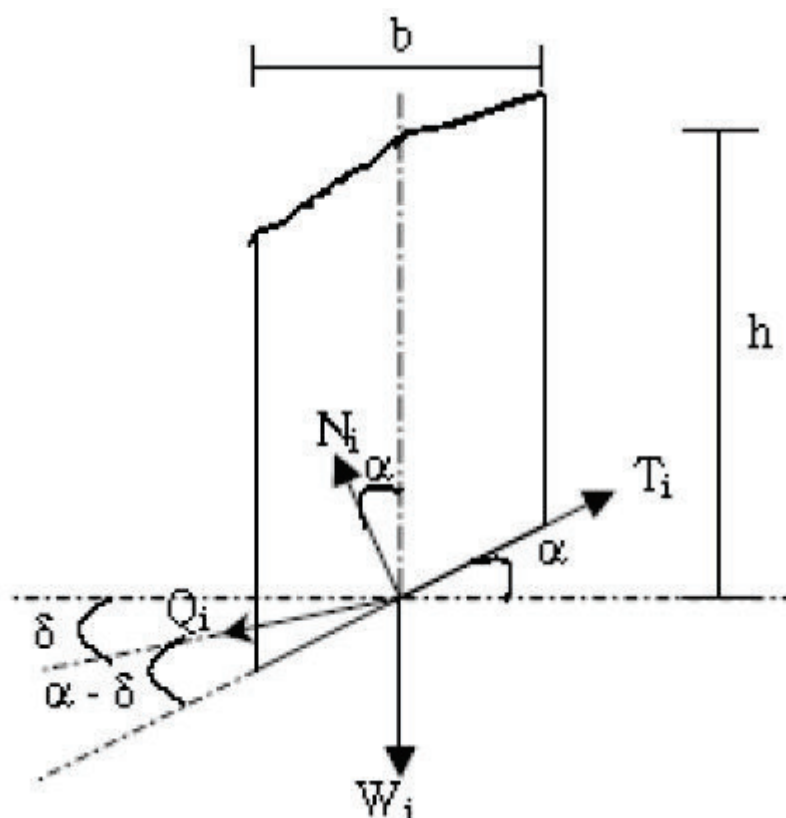
Do ponto de vista matemático e computacional, devido a essa premissa, tanto o Fator de Segurança (FS) quanto a inclinação constante das forças atuantes entre as fatias tornam-se incógnitas do problema, exigindo um rigoroso processo iterativo para a sua determinação. É importante destacar que a literatura estabelece uma conexão direta entre esta teoria e o método discutido no tópico anterior: conforme demonstram Cheng e Lau (2008), quando se adota no método de Morgenstern-Price uma função de distribuição arbitrária $f(x)=1,0$ (que representa uma relação perfeitamente constante ao longo de todas as lamelas), ele se reduz e torna-se estritamente equivalente ao Método de Spencer.

Considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e aplicando o equilíbrio nas direções normal e paralela à base da fatia chega-se à equação:

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot b \cdot \sec \alpha}{F} + \frac{\tan \phi \cdot (H \cos \alpha - u b \sec \alpha)}{F} - W \sec \alpha}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \left[1 + \frac{\tan(\alpha - \delta)}{F} \right]} \quad (11)$$

onde: Q: Força interlamelar total atuante nas faces verticais entre as fatias de solo; c' : Coesão efetiva do material na base da fatia; b: Largura geométrica da fatia discretizada; α : Ângulo de inclinação da base da fatia em relação à horizontal; ϕ : Ângulo de atrito interno efetivo do solo; H: Força normal interlamelar total (ou componente horizontal) atuante na fatia; u: Pressão neutra (poropressão) atuante na base da fatia; W: Peso total da fatia de solo considerada no modelo; δ : Ângulo de inclinação constante das forças interlamelares laterais.

Figura 13 – Forças atuantes nas fatias no Método de Spencer.



Fonte: VECCI (2018).

Assim como ocorreu com o método de Morgenstern-Price, a solidez teórica do método de Spencer fez com que ele fosse amplamente adaptado para as modernas análises tridimensionais (3D) de encostas e barragens.

Na revisão detalhada sobre o estado da arte na área conduzida por Kumar, Choudhary e Burman (2023), relata-se que a formulação de Spencer tem servido de alicerce para diversos modelos 3D. Os autores destacam, por exemplo, o trabalho de Chen et al. (2003), que desenvolveram um método 3D simplificado a partir da extensão direta da metodologia de Spencer. Nesta abordagem tridimensional, os equilíbrios globais de forças e momentos foram utilizados para encontrar o Fator de Segurança, embora os autores tenham assumido superfícies de ruptura rotacionais e negligenciado parte das forças de cisalhamento intercolunares verticais para viabilizar matematicamente o problema computacional (KUMAR; CHOUDHARY; BURMAN, 2023).

Além do cálculo do fator de segurança em si, a modelagem 3D enfrenta o desafio de prever a direção crítica na qual a massa de solo vai escorregar (conhecida como Direction of Slide - DOS). Kumar, Choudhary e Burman (2023) apontam que

Jiang e Yamagami (2004) apresentaram uma importante contribuição para resolver este problema ao formularem uma técnica 3D combinando os princípios da análise variacional com o método de Spencer estendido para colunas. Satisfazendo os equilíbrios de forças e momentos e adotando algoritmos de programação dinâmica, essa extensão do método de Spencer permitiu aos pesquisadores localizar com sucesso a geometria crítica tridimensional da ruptura e calcular o menor fator de segurança, provando ser altamente compatível com abordagens variacionais de otimização de estabilidade.

2.2.4 Método de Sarma

O método desenvolvido por Sarma (1973; 1979) enquadra-se no seletivo grupo de abordagens rigorosas de equilíbrio limite. Assim como as metodologias de Morgenstern-Price e de Spencer, a sua principal característica teórica é a satisfação integral de todas as equações de equilíbrio da Estática — garantindo o balanço de forças horizontais, verticais e o equilíbrio global de momentos para a massa de solo instável em superfícies de ruptura de qualquer formato (GERSCOVICH, 2016).

A grande diferença do método de Sarma reside na hipótese matemática adotada para solucionar a severa indeterminação estática inerente à divisão geométrica do maciço em fatias. Enquanto o método de Spencer assume que as forças interlamelares possuem uma inclinação constante e o de Morgenstern-Price as distribui segundo uma função arbitrária $f(x)$, o método de Sarma lida com a resistência mobilizada entre as fatias de uma forma completamente distinta (CHENG; LAU, 2008).

Conforme detalham Cheng e Lau (2008), a formulação de Sarma assume a premissa de que o fator de segurança ao longo das faces verticais (interfaces) entre as lamelas é rigorosamente igual à unidade ($FS=1,0$). Isso significa que o método pressupõe que o material está na iminência de ruptura (com a resistência ao cisalhamento plenamente mobilizada) não apenas na base da superfície de escorregamento, mas também nas superfícies de contato verticais internas entre as fatias de solo (CHENG; LAU, 2008). Devido à enorme complexidade algébrica de equilibrar todo esse sistema de forças simultaneamente, a resolução manual é inviável, tornando indispensável o uso de programas de computador (GERSCOVICH, 2016).

No que tange aos avanços para o ambiente tridimensional (3D), a revisão detalhada conduzida por Kumar, Choudhary e Burman (2023) sobre o estado da arte

das análises de estabilidade destaca uma importante evolução envolvendo as metodologias associadas a Sarma.

Devido à dificuldade histórica de adaptar métodos rigorosos de lamelas diretamente para modelos 3D complexos (onde a direção do escorregamento varia e as equações aumentam exponencialmente), as pesquisas recentes passaram a integrar as formulações de equilíbrio limite com metodologias numéricas de deformação. Na revisão de Kumar, Choudhary e Burman (2023), ressalta-se especificamente a importante contribuição desenvolvida por Tan e Sarma (2008).

Estes pesquisadores utilizaram o Método dos Elementos Finitos (FEM) não como uma abordagem isolada, mas para avaliar e verificar de forma rigorosa uma nova técnica baseada nos princípios do Método de Equilíbrio Limite (KUMAR; CHOUDHARY; BURMAN, 2023). Por meio desse acoplamento avançado, a técnica pôde ser aplicada com sucesso na modelagem 3D tanto de taludes homogêneos quanto não homogêneos, empregando regras de fluxo não associadas do material (KUMAR; CHOUDHARY; BURMAN, 2023). Isso demonstra que o legado analítico de Sarma continua impulsionando o estado da arte, servindo de base para validações cruzadas com o Método dos Elementos Finitos nas análises tridimensionais modernas.

2.3 ANOMALIAS GEOTÉCNICAS

As estruturas de terra podem apresentar uma vasta gama de patologias geotécnicas e hidráulicas ao longo de sua vida útil, decorrentes de diversos fatores construtivos e ambientais. No entanto, para fins deste estudo, não se pretende exaurir o catálogo de anomalias existentes. O foco desta seção concentra-se especificamente nas anomalias simuladas de forma fictícia para a estrutura em análise, visando compreender o impacto mecânico e estatístico desses cenários progressivos na estabilidade global do maciço.

2.3.1 Colmatção de sistemas drenantes

A colmatção é um fenômeno físico progressivo que compromete severamente a eficiência dos sistemas de drenagem geotécnica ao longo do tempo. Na literatura contemporânea, esse processo é frequentemente descrito como "colmação mecânica" ou sufusão interna, ocorrendo quando partículas finas do solo são translocadas pelo fluxo e depositadas no sistema drenante, obstruindo os poros do

material granular e reduzindo drasticamente a sua condutividade hidráulica (AL-YAQOUBI et al., 2024).

A gravidade desse fenômeno e seus impactos reais na percolação são categoricamente comprovados pelas investigações recentes de Al-Yaqoubi et al. (2024). Em seu estudo focado em barragens de terra, os autores demonstram analítica e experimentalmente que a colmatção do dreno de pé prejudica o regime normal de percolação, elevando a superfície freática a ponto de fazê-la aflorar no talude de jusante. Como descrevem os pesquisadores em citação direta (em tradução livre):

"O efeito prejudicial da colmatção dos drenos de pé de barragens é evidenciado pela elevação da superfície freática e seu afloramento no talude de jusante. Isso está associado a um aumento da pressão neutra em todo o maciço de solo do aterro" (AL-YAQOUBI et al., 2024, p. 2).

Essa constatação prática de elevação contínua das pressões neutras (u) vincula a colmatção diretamente ao risco de ruptura, fato perfeitamente explicado pelo Princípio das Tensões Efetivas. Conforme estabelece a literatura clássica, a resistência ao cisalhamento mobilizada por um solo depende da tensão efetiva, que é a diferença matemática entre a tensão total e a pressão neutra ($\sigma - u$) (CAPUTO, 1988). Portanto, ao provocar o acréscimo das pressões neutras no interior do maciço, a colmatção reduz a tensão efetiva, diminuindo a resistência ao cisalhamento disponível e, conseqüentemente, derrubando o Fator de Segurança (FS) da estrutura (GERSCOVICH, 2016).

A ineficiência do sistema de drenagem é tão crítica que é apontada como um dos principais gatilhos mecânicos para o colapso de obras de terra. Ao analisar as condições de longo prazo, Massad (2010) destaca a falha do sistema entre os riscos vitais, afirmando existirem: "[...] causas que podem levar a barragem à ruptura, como, por exemplo, um sistema de drenagem interna ineficiente, ou a colmatção gradual dos filtros, com o passar do tempo" (MASSAD, 2010, p. 73).

Para mitigar esse risco de instabilidade global, a engenharia moderna impõe o monitoramento contínuo. Al-Yaqoubi et al. (2024) concluem seu estudo atestando que os proprietários das estruturas devem monitorar ativamente as pressões neutras através de piezômetros padrão situados acima do dreno, nas "zonas vitais". Essa recomendação ratifica a premissa de Massad (2010), que há anos já apontava a

observação de campo por piezômetros como a única ferramenta viável de controle e garantia contra a colmatção progressiva das obras.

2.3.2 Surgências

A eficiência do sistema de drenagem interna é vital para o controle do fluxo tridimensional de água no interior do maciço. Conforme ensina Massad (2010), a função primordial dos filtros e drenos é interceptar a água de percolação, rebaixando a linha freática e garantindo que ela não atinja a face do talude de jusante. Entretanto, à medida que o fenômeno da colmatção evolui, esse mecanismo de proteção é severamente comprometido. Estudos numéricos recentes conduzidos por El-Molla (2026) comprovam que a acumulação progressiva de finos bloqueia os vazios do material drenante, reduzindo sua condutividade hidráulica. Como consequência física direta, o escoamento encontra maior resistência no dreno do que no próprio maciço, forçando a linha freática a se elevar continuamente em direção à face externa da estrutura (EL-MOLLA, 2026).

Quando a evolução da colmatção atinge um estágio crítico e a capacidade de vazão do dreno é suprimida, a linha freática rompe o confinamento do maciço e intercepta o talude de jusante, gerando o perigoso fenômeno da surgência (afloramento contínuo de água). Na pesquisa de El-Molla (2026), a modelagem de diferentes graus de obstrução atestou que a água é forçada a passar por cima da zona colmatada. Ao descrever as evidências de campo que indicam a falha iminente da estrutura, a autora ressalta, em citação direta (em tradução livre), que:

"[...] sinais de possível colmatção de drenos incluem aumento súbito e inexplicável na pressão neutra no lado de jusante da barragem, redução na vazão de percolação que sai do dreno, áreas úmidas ou surgências aparecendo na face de jusante da barragem acima do dreno, e deposição de sedimentos finos na superfície externa/face de saída do dreno" (EL-MOLLA, 2026, p. 25).

Figura 14 – Exemplo real de surgência no pé do aterro do talude.



Fonte: Arquivo pessoal do autor (2025).

O surgimento desses pontos de exsudação constitui um risco iminente de ruptura global. De acordo com Caputo (1988), quando a água percola e emerge na face do talude, ela gera gradientes hidráulicos de saída e forças de percolação que atuam no mesmo sentido da gravidade, tendendo a instabilizar a massa de solo. Paralelamente, esse afloramento reflete o acúmulo extremo de pressões neutras na região do pé do talude, o que reduz drasticamente a tensão efetiva e leva o Fator de Segurança a valores críticos de falha (GERSCOVICH, 2016). Consequentemente, como alerta El-Molla (2026), a surgência impulsionada pelo dreno colmatado enfraquece o solo e expõe diretamente a barragem a patologias severas, como escorregamentos superficiais (*sloughing*) e a erosão regressiva tubular (*piping*), culminando no colapso do barramento.

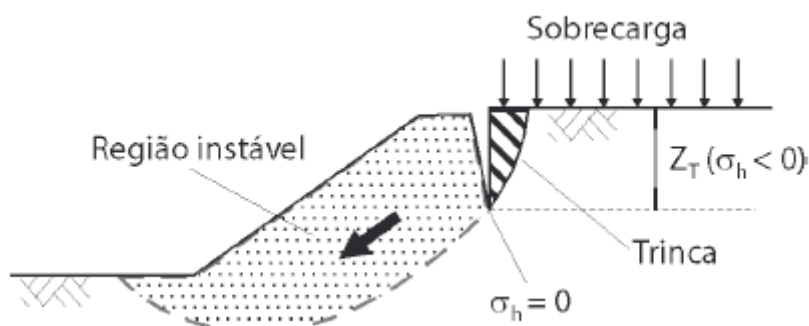
2.3.3 Trincas de tração e descontinuidades geométricas

A constatação de que a falha do sistema de drenagem não altera apenas o fluxo de água, mas atua como um agente mecânico que fratura a estrutura, é amparada por estudos recentes. Conforme investigado numericamente por Dey e Talukdar (2022), quando ocorre a colmatagem de um tapete drenante (falha da drenagem horizontal), há uma drástica alteração no regime de percolação que induz deformações severas na face de jusante do barramento.

O desequilíbrio das pressões não dissipadas pelo dreno sobrecarrega o contato entre a base do maciço e o solo de apoio. Ao avaliarem as consequências diretas dessa falha de drenagem, os autores atestam, em citação direta (em tradução livre), que: "[...] esse fenômeno pode possivelmente levar ao trincamento da fundação impermeável ou à ebulição de areia em uma fundação permeável" (DEY; TALUKDAR, 2022, p. 8). Ou seja, a falha crônica da drenagem interna deforma o material a ponto de cisalhar e trincar diretamente as camadas de fundação sobre as quais a barragem está assentada.

Na superfície dos taludes (especialmente em solos coesivos), é comum a geração das chamadas "trincas de tração" antes mesmo que ocorra o escorregamento da encosta (GERSCOVICH, 2016). Quando essa descontinuidade se abre, a porção de solo localizada na região da fenda deixa de contribuir para a estabilidade global. A situação torna-se ainda mais severa se essas fissuras forem preenchidas por água de chuva, o que introduz esforços hidrostáticos adicionais no interior da descontinuidade que elevam os momentos instabilizantes (GERSCOVICH, 2016).

Figura 15 – Representação da trinca de tração em um talude.



Fonte: GERSCOVICH (2016).

Adicionalmente, as trincas podem levar ao desprendimento maciço de blocos. Em situações onde a estrutura sofre solapamento de base (como durante o vertimento e erosão de uma brecha), os solos coesivos formam paredes verticais que não resistem ao próprio peso. Esse colapso ocorre puramente devido à instabilidade à tração da massa terrosa (também conhecida na literatura como tensile instability), gerando fendas verticais e quedas de blocos (ALVAREZ et al., 2025).

No interior do maciço, as trincas longitudinais também podem ser geradas pela incompatibilidade de deformações entre materiais de rigidezes distintas. Massad

(2010) descreve que isso ocorre com frequência em barragens zoneadas através do fenômeno de arqueamento (conhecido como "efeito de silo").

Quando um núcleo de argila é muito compressível, ele tende a recalcar mais do que os espaldares laterais de enrocamento. No entanto, esse rebaixamento é contido pelo atrito nas interfaces. Como consequência mecânica, o peso do núcleo passa a ser suportado pelas zonas laterais, aliviando a tensão vertical no centro e originando perigosas trincas verticais direcionadas no mesmo sentido do fluxo de água (MASSAD, 2010).

A presença dessas discontinuidades representa um perigo extremo. Na prática, costuma-se usar o jargão de que "a água é 'pontuda'" (MASSAD, 2010, p. 199), o que significa que, se houver qualquer trinca gerada por recalque ou falha de fundação, a água invariavelmente forçará a passagem por ela. A infiltração concentrada através desses defeitos e fissuras estruturais anula os sistemas de vedação e dá início ao letal processo de erosão regressiva tubular (piping), destruindo a obra de terra de dentro para fora.

2.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E PROBABILÍSTICA

Dada a variabilidade intrínseca dos materiais geológicos, a abordagem determinística isolada pode não ser suficiente para cobrir todas as incertezas de um projeto. Dentro do vasto campo da estatística aplicada à geotecnia, o foco desta seção recai especificamente sobre as ferramentas probabilísticas utilizadas na pesquisa. Entre elas, destaca-se o método Response Surface, que foi adotado por apresentar a melhor adaptação à modelagem computacional da seção estudada, permitindo uma quantificação eficiente dos índices de confiabilidade.

2.4.1 Incerteza e variabilidade geotécnica

Na engenharia de estruturas, trabalha-se frequentemente com materiais como o aço e o concreto, que são fabricados em ambientes industriais rigorosamente controlados. Contudo, em projetos de barragens e obras de terra, a justificativa física para a adoção da análise probabilística baseia-se na gênese caótica do material de construção.

Conforme explicam Zhang et al. (2022), os solos possuem uma variabilidade espacial intrínseca que é resultado direto das variações em sua composição mineralógica e dos diferentes históricos de tensões sofridos durante os processos

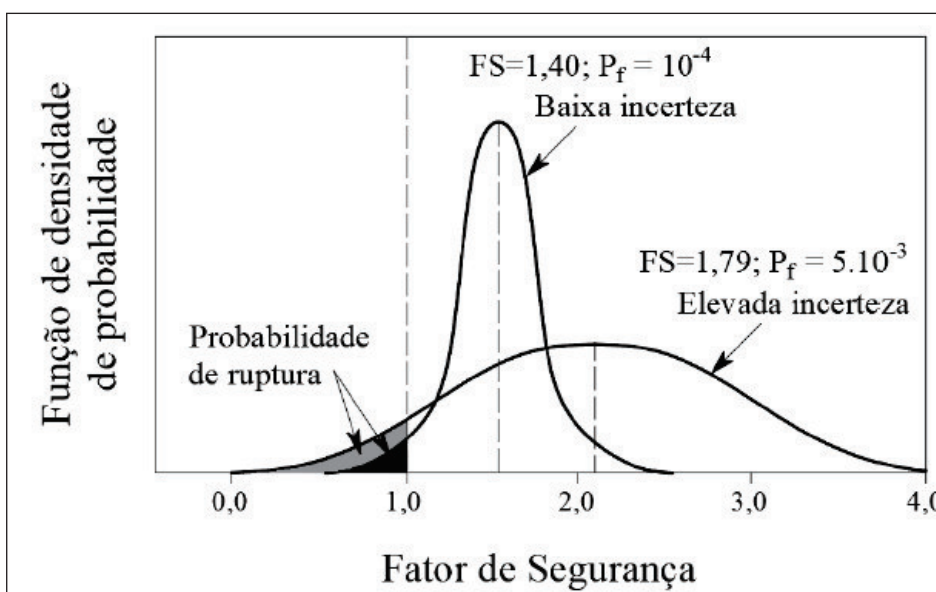
geológicos de deposição. Essa formação natural — atrelada ao intemperismo, transporte e sedimentação — confere ao maciço terroso uma profunda heterogeneidade (VECCI, 2018).

Além dessa realidade física, a justificativa filosófica para o uso da estatística na geotecnia é o reconhecimento acadêmico das nossas limitações operacionais em medir as propriedades desse meio. Ao descrever as classes de incertezas em um projeto, a literatura destaca a influência dos erros estatísticos de amostragem (decorrentes da quantidade invariavelmente restrita de furos de sondagem em campo) e as limitações práticas dos ensaios de laboratório, que incluem perturbações no manuseio das amostras ou ruídos de calibração que geram medidas tendenciosas (VECCI, 2018).

A principal consequência dessa complexidade física é que um maciço de terra jamais será um bloco de comportamento perfeitamente uniforme. Vecchi (2018, p. 28) atesta que os solos são materiais de difícil previsão, "pois suas características podem variar de ponto a ponto". Isso significa, de forma prática, que se extrairmos amostras de dois pontos distintos de um mesmo aterro ou de um mesmo núcleo argiloso de uma barragem, elas invariavelmente apresentarão valores ligeiramente diferentes para a coesão efetiva (c') e para o ângulo de atrito efetivo (ϕ'). Diante dessa constatação, a engenharia moderna reconhece que esses parâmetros de resistência flutuam ao longo do espaço e exigem ser tratados matematicamente como funções ou variáveis aleatórias dentro de uma curva de distribuição (MENDES, 2019).

Como ilustrado na Figura 16, a aplicação da estatística revela que o Fator de Segurança (FS) não é um número fixo e absoluto, mas sim uma curva de distribuição de probabilidade. Essa representação gráfica demonstra de forma visual que, devido à variabilidade natural e à dispersão dos parâmetros de resistência do solo (como coesão e ângulo de atrito), os resultados de estabilidade oscilam em torno de um valor médio. A principal função desse gráfico é evidenciar o perigo de se basear exclusivamente no determinismo: dependendo do grau de incerteza e da dispersão dos dados geológicos, uma parcela da curva de distribuição pode invadir a zona de instabilidade (área onde o $FS \leq 1$), revelando uma probabilidade real de ruptura da estrutura mesmo quando o valor médio do FS parece aceitável.

Figura 16 – Gráficos para distribuição do Fator de Segurança.



Fonte: MENDES (2019).

É exatamente na flutuação e dispersão desses parâmetros que reside a grande crítica aos métodos clássicos. Zhang et al. (2022) ressaltam que a análise determinística convencional é fisicamente incapaz de levar em conta a variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos. Ela se fundamenta no emprego exclusivo de um "valor médio" para representar a resistência do solo em toda a extensão da superfície de ruptura. O erro conceitual dessa premissa é explicitado em citação direta:

"O Fator de Segurança (FS) é o resultado típico obtido em análises determinísticas. O procedimento considera apenas os valores médios dos parâmetros do solo, desconsiderando, portanto, a variabilidade natural dos mesmos" (VECCI, 2018, p. 15).

Ao engessar o cálculo na média aritmética da coesão e do ângulo de atrito, o determinismo tradicional ignora a dispersão estatística dos dados, tratando uma estrutura geológica caótica com as mesmas premissas de um material controlado. A literatura adverte que esse simplismo mascara severos riscos reais de colapso, uma vez que "desprezar as incertezas dos parâmetros geotécnicos pode levar a resultados pouco confiáveis sobre a segurança de taludes" (VECCI, 2018, p. 14).

Em suma, um Fator de Segurança médio numericamente aceitável não garante que a barragem está isenta de perigo. Como atestam Zhang et al. (2022), a análise probabilística tornou-se a via predominante (*mainstream*) justamente por avaliar a estabilidade de forma quantitativa e muito mais racional, revelando os riscos que uma

eventual alta dispersão na resistência do solo (escondida pelo cálculo da média) traria para a probabilidade de ruptura da obra.

2.4.2 Método de superfície de resposta

No âmbito das análises probabilísticas avançadas, o Método de Superfície de Resposta (Response Surface Methodology) destaca-se como uma evolução analítica criada para contornar as severas limitações de tempo e de processamento computacional inerentes aos métodos tradicionais. O RSM consiste em um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para desenvolver, melhorar e otimizar processos naqueles casos em que diversas variáveis de entrada influenciam diretamente uma medida de desempenho final (BAGHERZADEH KHALKHALI; IZADI, 2024).

Na geotecnia aplicada à estabilidade de taludes, o RSM atua fundamentalmente como uma "ponte" estatística capaz de construir a relação matemática direta e simplificada entre os resultados da análise original (como o Fator de Segurança) e as variáveis aleatórias do maciço, como a coesão e o ângulo de atrito (ZHANG et al., 2022).

A premissa central do método é substituir as complexas e demoradas rotinas de cálculo de *software* baseados em Equilíbrio Limite ou no Método dos Elementos Finitos por uma equação matemática aproximada (a "superfície"). Em vez de rodar o programa geotécnico milhares de vezes, o engenheiro realiza um número reduzido e otimizado de análises físicas apenas para calibrar essa equação preditiva (BAGHERZADEH KHALKHALI; IZADI, 2024).

Conforme detalham Zhang et al. (2022), na prática geotécnica utiliza-se frequentemente uma função polinomial de segunda ordem para aproximar a função de desempenho (o Fator de Segurança) em relação aos parâmetros de entrada do solo.

$$FS^i(X) = a_0 + \sum_{j=1}^N b_j x_j + \sum_{j=1}^N c_j x_j^2 \quad (12)$$

onde: $FS^i(X)$ é o Fator de Segurança estimado para a superfície de ruptura analisada, c_j são os coeficientes quadráticos de regressão para cada variável j , x_j^2 é o valor da variável de entrada elevado ao quadrado, b_j é o coeficiente linear de regressão para cada variável j , j é o índice da variável que está sendo avaliada naquele termo do

somatório, N o número total de variáveis aleatórias (parâmetros de entrada) consideradas no seu modelo e a_0 o termo independente (ou intercepto) do polinômio.

Uma vez estabelecida essa equação de Superfície de Resposta calibrada, toda a análise de confiabilidade e o cálculo probabilístico passam a ser feitos resolvendo-se diretamente o polinômio, o que exige um esforço computacional praticamente insignificante (ZHANG et al., 2022).

A principal justificativa para a adoção do RSM está na sua eficiência operacional perante a clássica Simulação de Monte Carlo (MCS). Embora o método de Monte Carlo direto seja exato e estatisticamente robusto, ele é classificado na literatura como um procedimento extremamente oneroso (time-consuming), pois exige a execução e a convergência de milhares de simulações iterativas completas na modelagem física (ZHANG et al., 2022).

Além do ganho expressivo na velocidade de cálculo da probabilidade de ruptura global, pesquisas contemporâneas demonstram o imenso valor do RSM para processos de retroanálise (back analysis) baseados em instrumentação de campo. Bagherzadeh Khalkhali e Izadi (2024) comprovam que é perfeitamente viável utilizar dados de recalque e deslocamento obtidos a partir da instrumentação física de uma barragem para calibrar a equação da Superfície de Resposta. Isso permite que o projetista faça o "caminho inverso", descobrindo quais são os verdadeiros parâmetros de resistência e de deformação que estão de fato operando no interior do maciço real, de forma matemática e otimizada (BAGHERZADEH KHALKHALI; IZADI, 2024).

2.4.3 Distribuição de probabilidade

Na engenharia geotécnica moderna, em vez de executar milhares de simulações onerosas no *software* de modelagem (como ocorre no método crú de Monte Carlo), adota-se o Método de Superfície de Resposta (RSM). Conforme atestam Zhang et al. (2022), o RSM atua como uma "ponte" matemática capaz de construir a relação direta entre as respostas da análise original (o Fator de Segurança) e as variáveis aleatórias do maciço. Para construir e alimentar a equação explícita dessa "superfície", os parâmetros de resistência do solo deixam de ser números fixos e exigem uma representação baseada em propriedades estatísticas.

Para caracterizar essas variáveis aleatórias na modelagem, o método utiliza os chamados momentos estatísticos. O primeiro momento é a $E[X]$, que representa o valor central esperado das propriedades do solo coletadas em campo ou laboratório.

Contudo, como o fator de segurança é sensível às incertezas do material, apenas o uso da média é insuficiente, sendo imprescindível conhecer a função de densidade de probabilidade para medir a dispersão dos dados. Para quantificar esse grau de incerteza em torno da média, as formulações utilizam o Desvio Padrão (σ).

Na modelagem probabilística, a quantificação das incertezas dos parâmetros do solo é realizada por meio do Coeficiente de Variação (CV). Segundo Mendes (2019, p. 5), "o coeficiente de variação é definido por Levine et. al. (2008) como uma medida relativa de variação, visto que mostra, em porcentagem, a dispersão dos dados em relação à média dos mesmos". De forma complementar, Vecchi (2018, p. 30) corrobora e detalha matematicamente esse conceito, definindo-o como uma "[...] medida de dispersão dos dados em relação à sua própria média aritmética. Dessa forma, por expressar a dispersão de forma relativa e percentual, o CV atua como uma ferramenta estatística essencial para comparar a variabilidade entre grandezas geotécnicas independentemente de suas unidades de medida originais.

$$Cv(x) = \frac{\sigma}{E[X]} \cdot 100 \quad (13)$$

Figura 17 – Valores típicos de coeficiente de variação sugeridos por Sandroni e Sayão

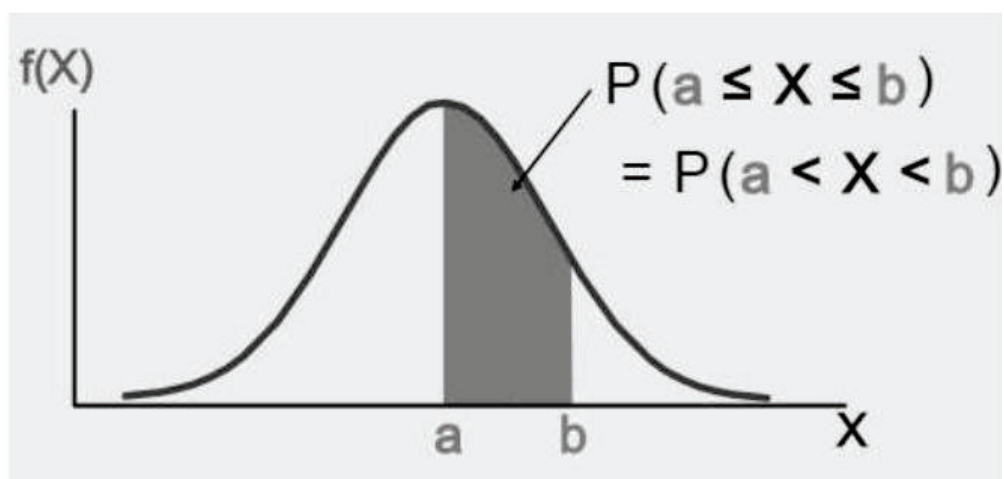
Valores típicos do coeficiente de variação.	
<i>Parâmetro</i>	<i>Coeficiente de Variação</i>
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo efetivo de resistência	10 (04 a 20)
Coesão não-drenada	30 (20 a 50)

Fonte:

MENDES (2019).

Ao inserir a Média e o Desvio Padrão na equação matemática do RSM, as propriedades do solo devem obedecer a um comportamento geométrico ditado pelas funções de distribuição. Na literatura geotécnica, as distribuições contínuas mais utilizadas para modelar a resistência e a permeabilidade dos geomateriais são a Normal (Gaussiana) e a Lognormal. A seguir encontra-se a representação da Função Normal e em seguida a equação da função que representa a sua parte hachurada:

Figura 18 – Gráfico de Distribuição Normal.



Fonte: VECCI (2018).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \cdot e^{\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (14)$$

A escolha correta da distribuição é fundamental para garantir que, durante o cálculo probabilístico, os parâmetros variem apenas dentro de limites fisicamente coerentes. A adoção irrestrita da distribuição Normal para parâmetros com grande desvio padrão pode gerar uma anomalia matemática: a cauda da curva pode atingir valores negativos, fazendo o modelo considerar uma coesão menor que zero. Para impedir que propriedades reais do solo assumam valores fisicamente impossíveis, os projetistas adotam funções como a Lognormal (que é estritamente positiva) ou aplicam uma regra de truncamento à curva Normal. Ao relatar os limites de inserção de dados em análises probabilísticas, Mendes (2019) atesta essa necessidade de correção em citação direta:

"[...] para alguns valores de coesão e de razão de resistência a cauda inferior da distribuição possuía valores negativos; nesse caso, a distribuição foi truncada no valor zero. [...] a única influência do truncamento da distribuição no valor zero é que os valores negativos não serão sorteados" (MENDES, 2019, p. 68-69).

2.4.4 Índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura

Ao contrário dos métodos determinísticos convencionais que se encerram na obtenção de um único Fator de Segurança (FS) médio, as análises probabilísticas

avanzadas culminam na obtenção de duas grandezas fundamentais para a tomada de decisão na engenharia: o Índice de Confiabilidade (β) e a Probabilidade de Ruptura (Pr ou Pf) da estrutura analisada (VECCI, 2018; ZHANG et al., 2022).

A transição para esses indicadores é necessária porque, como atesta a literatura, não existe uma correlação direta e absoluta entre os valores de FS e Pr. Devido às incertezas e dispersões geométricas, "existem casos onde o valor de FS é alto e o de Pr é baixo, e outros casos em que os valores de FS e Pr são ambos altos" (VECCI, 2018, p. 14).

O passo inicial de verificação da segurança probabilística dá-se pelo cálculo do β . Em citação direta, Vecchi (2018) define a importância desse parâmetro:

"O resultado obtido em uma análise probabilística é uma grandeza chamada índice de confiabilidade (β). Quando FS apresenta distribuição normal (ou gaussiana), ele é expresso pela Equação 14, indicando o número de desvios padrão que distanciam o E[FS] calculado das situações de ruptura, quando FS=1" (VECCI, 2018, p. 39-40).

Matematicamente, o Índice de Confiabilidade mede o quão distante a média do Fator de Segurança (E[FS]) está do limite crítico de falha, penalizado pelo nível de incerteza do solo (o desvio padrão $\sigma[FS]$). Quanto maior for o desvio padrão dos parâmetros do maciço, menor será o Índice de Confiabilidade da barragem. Como estabelecido por Zhang et al. (2022), formulações que consideram a variabilidade espacial também utilizam o β para expressar a confiabilidade associada às frentes de ruptura do solo.

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma[FS]} \quad (15)$$

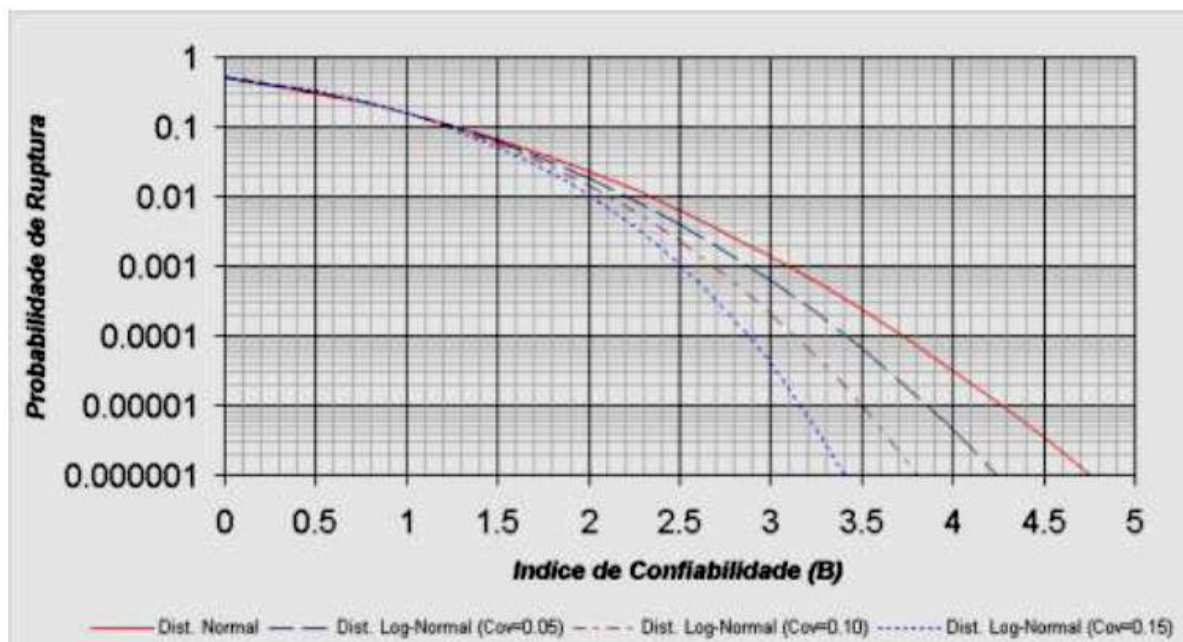
onde E[FS] é o valor determinístico de FS, e $\sigma[FS]$ é o desvio padrão do FS.

A Probabilidade de Ruptura consiste na tradução do Índice de Confiabilidade para a chance percentual (ou fracionária) de colapso estrutural. Em termos gráficos e estatísticos, Mendes (2019) esclarece que a probabilidade de ruptura equivale à "área sob o gráfico para $FS \leq 1$ ", ou seja, a área da curva de distribuição densidade de probabilidade que invade a zona de instabilidade.

O valor de β pode ser convertido diretamente em Probabilidade de Ruptura (Pr) por meio de funções acumuladas padronizadas (como a função $\Phi(X)$ descrita por Zhang et al., 2022) ou pelo uso de ábacos consolidados na literatura. É válido destacar

que essa conversão depende da função de distribuição atribuída ao comportamento do Fator de Segurança (Normal ou Lognormal).

Figura 19 – Índice de confiabilidade x probabilidade de ruptura



Fonte: VECCI (2018).

Na insuficiência de dados mais precisos sobre a verdadeira distribuição do solo, Flores (2008, apud VECCI, 2018) conclui que assumir uma distribuição puramente Normal para converter o β em Pr é um procedimento "a favor da segurança", pois a curva Normal tende a gerar probabilidades de ruptura ligeiramente maiores em comparação à Lognormal.

A obtenção da Probabilidade de Ruptura encerra o cálculo puramente estatístico e introduz o desafio da gestão de risco. A literatura ressalta que as análises probabilísticas quantificam apenas as incertezas possíveis de serem modeladas. Sendo assim, não existem valores universais intocáveis. Em citação direta:

"Ainda não existem valores de segurança normatizados para os índices probabilísticos. Portanto, os índices mínimos e máximos considerados são definidos considerando-se as possíveis perdas (de vidas e econômicas) em caso de ruptura, aliados ao custo da obra" (VECCI, 2018, p. 41).

Para balizar essa decisão, a engenharia mundial recorre aos Gráficos F-N (Gráficos de Farmer), que cruzam a probabilidade de colapso anual com as consequências projetadas (ex: número de vítimas fatais) para categorizar a barragem em zonas de "Risco Aceitável", "Risco Inaceitável" ou "Zona ALARP" (*As Low As Reasonably Practicable* - O mais baixo razoavelmente praticável) (MENDES, 2019).

Tanto Mendes (2019) quanto Vecchi (2018) convergem ao relatar a ordem de grandeza exigida para estruturas críticas. Com base em recomendações consolidadas internacionalmente (como as do *US Army Corps of Engineers* e da *ANCOLD - Australian National Committee on Large Dams*), admite-se como limite comum para o projeto de novas barragens uma probabilidade anual de ruptura na casa de 10^{-4} (ou 1 em 10.000) até 10^{-5} (MENDES, 2019; VECCI, 2018). Valores superiores a isso configuram riscos intoleráveis e exigem a imediata revisão do projeto ou estabilização da estrutura.

Figura 20 – Níveis de aceitação de probabilidades de ruptura, de acordo com o US Army Corps of Engineers.

Table B-1. Target Reliability Indices		
Expected Performance Level	Beta	Probability of Unsatisfactory Performance
High	5	0.0000003
Good	4	0.00003
Above average	3	0.001
Below average	2.5	0.006
Poor	2.0	0.023
Unsatisfactory	1.5	0.07
Hazardous	1.0	0.16

Note: Probability of unsatisfactory performance is the probability that the value of performance function will approach the limit state, or that an unsatisfactory event will occur. For example, if the performance function is defined in terms of slope instability, and the probability of unsatisfactory performance is 0.023, then 23 of every 1,000 instabilities will result in damage which causes a safety hazard.

Fonte: VECCI (2018).

2.5 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO BRASILEIRA

O gerenciamento de segurança de barragens no Brasil é regido por um amplo arcabouço legal. Dada a extensão e a complexidade desta temática, esta seção aborda de forma simplificada apenas as diretrizes e resoluções do âmbito federal mais relevantes para o contexto desta pesquisa. O foco concentra-se nos requisitos

obrigatórios que fundamentam os critérios de aceitabilidade técnica e a classificação de riscos operacionais das estruturas sob fiscalização nacional.

2.5.1 NBR 13028 (2024):

A recém-atualizada norma brasileira para projetos de barragens de mineração (ABNT, 2024) estabelece diretrizes rigorosas para a garantia da estabilidade física, operacional e ambiental dessas estruturas. No escopo do projeto, a avaliação de segurança exige a verificação obrigatória de múltiplos cenários críticos. Em citação direta, a norma determina que devem ser considerados "os seguintes mecanismos de ruptura: estabilidade de taludes, galgamento, erosão interna (piping) e liquefação, quando aplicável" (ABNT, 2024, p. 10).

No que se refere especificamente à estabilidade dos taludes, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024) orienta, de forma indireta, que os projetos avaliem obrigatoriamente o comportamento do maciço de partida, dos maciços de alteamento, da fundação e do próprio rejeito disposto, abrangendo análises dessas estruturas de forma isolada e em conjunto. Para representar fielmente as condições físicas em campo, as análises de carregamento sob condições drenadas devem ser conduzidas em tensões efetivas, utilizando parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento acoplados a poropressões previamente estimadas por meio de rede de percolação (ABNT, 2024).

A legislação brasileira mantém a obrigatoriedade da abordagem determinística de projeto, estipulando na Figura 21 os Fatores de Segurança (FS) mínimos exigidos para o maciço (ABNT, 2024). De forma indireta, os limites operacionais estatuem que o FS deve ser $\geq 1,5$ para o cenário de operação com o nível de água em sua cota máxima normal, e de $FS \geq 1,1$ para solicitações excepcionais extremas, a exemplo de carregamentos sísmicos.

Para as fases de final de construção e para o maciço operando sob a premissa de resistência não drenada de pico, a norma exige um FS mínimo de 1,3 (ABNT, 2024). Contudo, a norma faz um alerta técnico incisivo quanto à metodologia construtiva adotada, estabelecendo em citação direta uma restrição severa para barragens construídas em estágios: "Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como final de construção, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação" (ABNT, 2024, p. 11).

Figura 21 – Fatores de Segurança Mínimo Exigidos pela NBR 13028-2 atualizada.

Fase	Tipo de ruptura	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	1,1
Operação com rede de fluxo em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor)	Maciço	1,5
Operação com rede de fluxo em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal com resistência não drenada de pico ^b	Maciço e fundações	1,3
Solicitação sísmica, em condição de N.A do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor) ^c	Maciço e fundações	1,1

^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como final de construção, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.

^b Aplicável em análises sem presença de materiais com comportamento de *strain-softening* (amolecimento brusco em condições não drenadas). Para materiais com comportamento de *strain-softening*, as análises de estabilidade devem ser complementadas por meio de análise T-D utilizando modelos constitutivos que sejam capazes de reproduzir este fenômeno

^c A análise pseudoestática é uma abordagem simplificada de equilíbrio limite, sendo que deve ser complementada por análises de tensão-deformação (condições dinâmicas), a critério e julgamento de engenharia apropriado ou quando os valores de fatores de segurança obtidos estiverem muito próximos ou inferiores do valor mínimo recomendado.

Fonte: NBR 13028-2 (2024).

Um dos principais avanços documentados pela ABNT (2024) é o rigor exigido frente à possibilidade de liquefação, fenômeno caracterizado pela queda substancial na resistência ao cisalhamento de materiais granulares ou finos pouco densificados quando submetidos a carregamento em condição não drenada. Reconhecendo a insuficiência do Método de Equilíbrio Limite (MEL) isolado nessas circunstâncias de instabilidade, a norma técnica impõe que:

"Para materiais com comportamento de *strain-softening* (amolecimento brusco em condições não drenadas), as análises de estabilidade devem ser complementadas por meio de análise T-D utilizando modelos constitutivos que sejam capazes de reproduzir este fenômeno" (ABNT, 2024, p. 11).

Por fim, embora reconheça que os métodos baseados em relações constitutivas Tensão-Deformação (T-D) consigam capturar melhor a "natureza complexa do comportamento de geomateriais", a ABNT (2024, p. 11) adverte indiretamente que essas ferramentas numéricas avançadas não substituem a engenharia clássica. O normativo instrui que os modelos T-D devem ser empregados com elevado julgamento técnico e operados, preferencialmente, em conjunto com as metodologias de Equilíbrio Limite.

2.5.2 Panorama geral de resoluções da agência nacional de mineração (ANM):

A gestão da segurança de barragens de mineração no Brasil é fundamentada pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). No âmbito regulatório e de fiscalização, a Agência Nacional de Mineração (ANM) dita as regras operacionais por meio da Resolução ANM nº 95/2022, a qual foi consolidada e refinada pelas atualizações posteriores. De acordo com o Artigo 2º da Resolução ANM nº 95/2022, a anomalia é conceituada formalmente como "qualquer deficiência, irregularidade, anormalidade ou mau funcionamento que possa afetar a segurança, a funcionalidade ou a durabilidade da barragem de mineração".

Essas desconformidades devem ser avaliadas individualmente em campo e classificadas quanto ao seu status técnico em extintas, controladas ou não controladas. No que tange às condições mecânicas e estruturais da obra de terra, o instrumento formal que válida a segurança perante os órgãos fiscalizadores é a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), definida como o documento assinado pelo empreendedor e pelo responsável técnico que atesta a estabilidade da estrutura. (Resolução ANM nº 95/2022).

O principal ponto de convergência entre o monitoramento técnico e o compliance regulatório reside na associação direta entre o Estado de Conservação da estrutura e a sua Categoria de Risco (CRI). Conforme os critérios de classificação estabelecidos pela Resolução ANM nº 95/2022 e mantidos pelas resoluções complementares, a Categoria de Risco avalia os aspectos de projeto, o tempo de existência, os métodos construtivos e as condições de manutenção do maciço. Há um vínculo matemático e legal rígido entre a gravidade de uma desconformidade física (como a presença de trincas ou surgências no talude) e a elevação automática da Categoria de Risco global da barragem para o nível Alto.

Segundo a matriz de classificação disposta no Anexo IV da referida norma, a detecção de anomalias com pontuação máxima de 10 (dez) pontos em qualquer coluna do quadro de Estado de Conservação desativa o status de operação regular e atua como um gatilho para a instauração compulsória de uma Inspeção de Segurança Especial (ISE). Sob essa condição de criticidade, o empreendedor é obrigado a realizar novas análises numéricas de estabilidade e a preencher diariamente a Ficha

de Inspeção Especial (FIE) e o Relatório de Inspeção Especial (EIE) até que o vetor de risco seja classificado formalmente como extinto ou controlado.

Figura 22 – Classificação do Estado de Conservação.

QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC				
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (k)	Percolação (l)	Deformações e Recalques (m)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (n)	Drenagem Superficial (o)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)	Drenagem superficial existente e operante (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias, sem restrição operacional e extravasor com capacidade plena (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos sem medidas corretivas em implantação (4)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Drenagem superficial inexistente (5)
EC = $\sum (k \text{ até } o)$				

Fonte: Resolução 95° ANM (2022).

3 METODOLOGIA

O capítulo de metodologia tem como finalidade elucidar os caminhos teóricos e práticos adotados para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo subdividido em método de abordagem e método de procedimentos.

3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

O enquadramento metodológico consiste no exame e na classificação dos métodos, pressupostos e instrumentos que fundamentam a investigação científica. Para a consecução dos objetivos delineados neste trabalho, a pesquisa foi estruturada a partir de quatro eixos principais de classificação: quanto à natureza, quanto à abordagem do problema, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos técnicos.

Quanto à sua natureza, esta pesquisa classifica-se como pesquisa aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimentos direcionados à aplicação prática e à solução de problemas específicos de engenharia geotécnica. O estudo não visa o desenvolvimento de novas teorias acadêmicas, mas sim a aplicação de conceitos consolidados de mecânica dos solos e percolação em um modelo prático e crítico de engenharia.

No que se refere à abordagem do problema, o estudo assume caráter estritamente quantitativo, visto que traduz em dados numéricos e métricas exatas as variáveis investigadas. A análise apoia-se em formulações matemáticas e modelos computacionais mecânico-hidráulicos para a determinação de fatores de segurança (FS), taxas de fluxo e probabilidades de ruptura (PF), recorrendo a ferramentas estatísticas para o tratamento da variabilidade dos parâmetros.

Sob o ponto de vista dos objetivos, a pesquisa enquadra-se como explicativa. Segundo Gil (2002), a pesquisa explicativa tem como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Neste trabalho, busca-se ir além da mera descrição do comportamento do maciço, explicando detalhadamente as causas e os impactos gerados por diferentes cenários de anomalias na estabilidade global da estrutura analisada.

Por fim, em relação aos procedimentos técnicos, o delineamento da pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso associado à modelagem computacional (ou simulação). Configura-se como um estudo de caso por realizar uma investigação profunda e exaustiva de uma unidade bem delineada, caracterizada por uma barragem de terra adotada de forma conceitual como objeto de estudo. Paralelamente, o método apoia-se na simulação numérica em ambiente computacional por meio do *software Slide2D*, concebida explicitamente como uma simulação de condições hipotéticas e não reais de uma barragem. Dessa forma, as análises reproduzem virtualmente um comportamento puramente teórico e acadêmico do modelo estrutural diante de cenários críticos de anomalias, sem qualquer correspondência com uma estrutura física real ou em condições operacionais vigentes.

3.2 MÉTODO DE PROCEDIMENTO

Os procedimentos metodológicos adotados para a execução desta pesquisa compreendem etapas sequenciais que vão desde o embasamento teórico até a interpretação final dos dados numéricos. A sequência detalhada dos passos executados está representada de forma sintética na Figura 23.

Figura 23 – Métodos de Procedimentos para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autor (2026).

Como ilustrado na Figura 23, o fluxograma de execução da pesquisa foi estruturado em blocos lógicos e sequenciais. A fase inicial consistiu na construção do modelo conceitual, abrangendo a definição da geometria da seção de estudo e a adoção dos parâmetros materiais, tanto na via determinística (resistência ao cisalhamento e permeabilidade) quanto na via estatística (coeficientes de variação e médias). Com essa base estabelecida, a metodologia avança para o planejamento das simulações, onde foram estruturados os cinco cenários hipotéticos de anomalias cumulativas.

A etapa central do procedimento ocorreu na modelagem computacional (*software Slide2D*), parametrizada em duas frentes simultâneas: a configuração determinística para a obtenção do Fator de Segurança pelos métodos rigorosos de

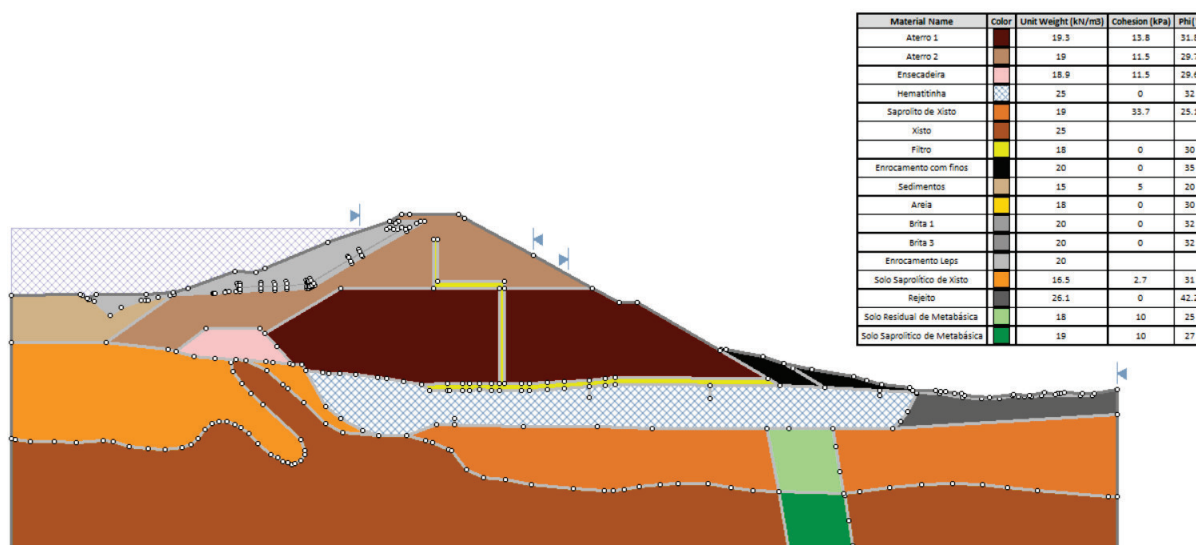
equilíbrio limite, e a configuração probabilística viabilizada pelo Método da Superfície de Resposta. O fluxo metodológico culmina na geração dos Resultados, etapa na qual os indicadores quantitativos (Fator de Segurança, Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade) são extraídos e interpretados à luz das exigências normativas de segurança.

3.2.1 Definição da seção de estudo

Para a realização das simulações numéricas, adotou-se uma seção transversal geométrica multizonada estabelecida de forma conceitual como modelo de referência. Esta modelagem constitui uma simulação de condições hipotéticas e não reais de uma barragem, sendo voltada para fins puramente acadêmicos e analíticos, sem correspondência com o estado operacional atual de uma estrutura física específica.

O corpo do modelo compreende o zoneamento de um maciço compactado contendo regiões distintas de aterro e ensecadeira incorporada, assentado sobre uma fundação estratificada de grande complexidade geotécnica, a qual simula horizontes de solo saprolítico, solo residual e formações rochosas de xisto e metabásica. A drenagem interna e o controle do fluxo de percolação do modelo são constituídos por um filtro vertical acoplado a um tapete drenante horizontal de areia, o qual se conecta diretamente a uma camada drenante de minério britado caracterizada como hematitinha, direcionando o fluxo para um dreno de pé em enrocamento situado a jusante. A geometria completa da seção transversal teórica, a distribuição espacial de suas zonas e a posição do nível de água inicial de controle estabelecido para o reservatório estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Seção de estudo.



Fonte: Autor (2026).

3.2.2 Definição dos parâmetros determinísticos adotados

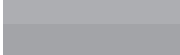
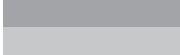
O procedimento para a caracterização física, mecânica e hidráulica de todas as camadas que integram o modelo baseia-se na atribuição de propriedades fundamentais, especificamente o peso específico, a coesão, o ângulo de atrito interno e o coeficiente de permeabilidade. De forma global, os parâmetros de resistência e permeabilidade inseridos no *software* foram definidos com base em ensaios laboratoriais preexistentes, ensaios de campo e correlações consolidadas na literatura geotécnica, provenientes de estudos conceituais anteriores. No entanto, com o objetivo de delimitar o escopo do trabalho e manter o foco estritamente na análise computacional, a apresentação detalhada e a justificativa fundamentada das propriedades concentram-se apenas nos materiais que perpassam a zona de ruptura potencial.

A escolha de focar a exposição nos materiais que perpassam essa região específica justifica-se pela sua relevância cinemática, visto que são as camadas que governam a resistência ao cisalhamento ao longo da superfície crítica de deslizamento, ditando diretamente o cálculo do Fator de Segurança (FS) e da Probabilidade de Ruptura (PF). Para os demais horizontes e zonas estruturais do modelo, embora os parâmetros de entrada e coeficientes de permeabilidade também sejam respaldados pelo conjunto de investigações de campo, laboratório e suporte teórico da literatura, os dados não são detalhados exhaustivamente no texto,

garantindo a consistência e a robustez matemática das simulações sem desviar o foco principal da pesquisa.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de resistência e a Tabela 2 apresenta os parâmetros de permeabilidade do material utilizados no estudo.

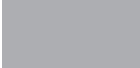
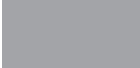
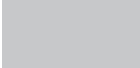
Tabela 1 – Parâmetros de resistência utilizados no estudo.

Material	Legenda	(kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
Aterro I		19,3	13,8	31,8
Aterro II		19	11,5	29,7
Ensecadeira		18,9	11,5	29,6
Hematitinha		25	0	32
Saprólito de Xisto		19	33,7	25,1
Xisto		25	-	-
Filtro			0	30
Enrocamento com finos		20	0	35
Sedimentos		18	5	20
Areia			0	30
Brita 1		20	0	32
Brita 3		20	0	32
Enrocamento Leps		20	-	-
Solo Saprolítico de Xisto		16,5	2,7	31
Rejeito		26,1	0	42,2
Solo Residual de Metabásica		18	10	25
Solo Saprolítico de Metabásica		19	10	27
Colúvio		14,9	14	33,4
Concreto		25	-	-
Rejeito (Montante)		23,4	8,5	32,7

Fonte: Autor (2026).

Tabela 2 – Parâmetros de permeabilidade utilizados no estudo.

Material	Legenda	Kv Mínimo (cm/s)	Kv Máximo (m/s)	Kv(m/s)	Kv/Kh
Aterro I		1.26E-08	2.00E-09	4,3E-08	1
Aterro II		2.75E-07	6.10E-08	4,00E-08	1

Material	Legenda	Kv Mínimo (cm/s)	Kv Máximo (m/s)	Kv(m/s)	Kv/Kh
Ensecadeira		1.19E-08	7.29E-09	1,19E-08	1
Hematitinha		-	-	3,20E-07	1
Saprólito de Xisto		1,59E-08		9,55E-08	1
Xisto		-	-	1,19E-07	1
Filtro		-	-	2,00E-04	1
Enrocamento com finos				1,00E-03	1
Sedimentos		-	-	1,00E-05	1
Areia		-	-	1,00E-04	1
Brita 1		-	-	1,50E-01	1
Brita 3		-	-	5,00E-01	1
Enrocamento Leps		-	-	1	1
Solo Saprolítico de Xisto		4.42E-06	2.18E-08	3,00E-08	1
Rejeito		5.39E-08		5,39E-08	1
Solo Residual de Metabásica		-	-	9,55E-07	1
Solo Saprolítico de Metabásica		-	-	9,55E-07	1
Colúvio		3.50E-07		3,50E-07	1
Concreto		-	-	1,00E-20	1
Rejeito (Montante)		2.11E-08	3.14E-08	5,39E-08	1

Fonte: Autor (2026).

No que tange aos materiais que compõem a superfície crítica, os parâmetros de laboratório foram validados estritamente no âmbito deste trabalho por meio da validação de dados pré-existentes. Essa validação, restrita aos materiais que perpassam a zona de ruptura potencial, permitiu a calibração do modelo computacional e garantiu que as propriedades inseridas reflitam com precisão o comportamento mecânico das camadas que governam o Fator de Segurança (FS) e a Probabilidade de Ruptura (PF).

- Aterro 1:

A definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para a modelagem numérica do Aterro 1 foi estabelecida a partir da análise integrada dos ensaios triaxiais consolidados isotopicamente e não drenados (CIUsat). A decisão metodológica pela escolha do critério de Máxima Obliquidade em detrimento ao de Máxima Tensão Desviatória justificou-se, primordialmente, pela maior consistência estatística do ajuste linear das amostras. O coeficiente de determinação obtido para a envoltória de Máxima Obliquidade ($R^2 = 0,9707$) mostrou-se superior ao observado no critério de Máxima Desviatória ($R^2 = 0,9361$), indicando menor dispersão e maior confiabilidade no comportamento conjunto do material ensaiado. Adicionalmente, esse critério resultou em um valor de coesão efetiva mais conservador ($c' = 13,8\text{kPa}$ em comparação a $19,2\text{ kPa}$), alinhando-se às recomendações de segurança em engenharia geotécnica, que visam mitigar incertezas relacionadas à perda de coesão por processos de intemperismo ou variações de umidade ao longo da vida útil da estrutura.

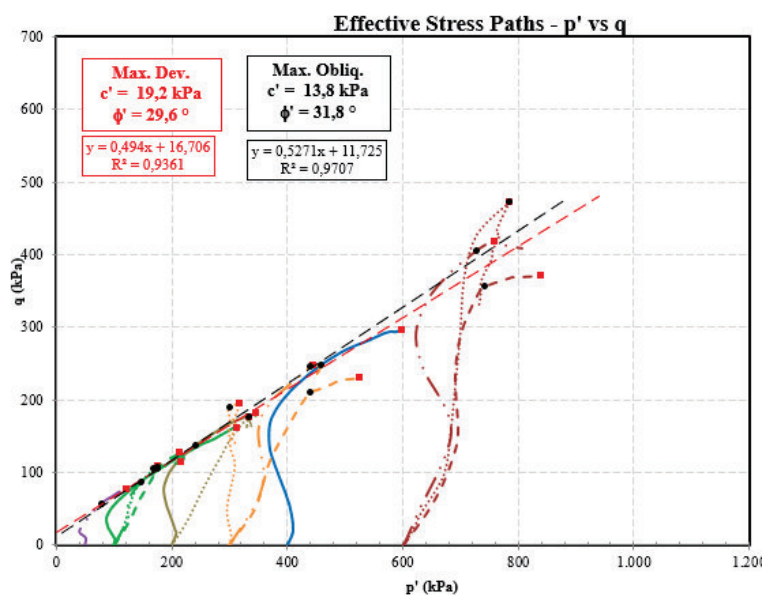
Sob o aspecto do comportamento mecânico, o critério de Máxima Obliquidade reflete o instante exato em que a razão entre a tensão cisalhante e a tensão normal efetiva atinge o seu valor máximo, evidenciando a mobilização plena do atrito interno do solo no plano de ruptura. Essa abordagem é altamente representativa para materiais que manifestam expressiva geração de poropressões positivas durante o cisalhamento (comportamento contrativo), permitindo uma caracterização mais próxima do estado crítico do solo. Dessa forma, integrando as evidências experimentais compiladas à modelagem computacional no *software Rocscience Slide2D*, o comportamento do Aterro 1 foi simulado por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas, adotando-se um peso específico (γ) de $19,3\text{ kN/m}^3$, coesão efetiva (c') de $13,8\text{ kPa}$ e ângulo de atrito efetivo (ϕ') de $31,8^\circ$.

Tabela 3 – Resultados da Compilação do Ensaio Triaxial CIUsat do Aterro 1.

AMOSTRA	PARÂMETROS EFETIVOS			
	MÁXIMA DESVIATÓRIA		MÁXIMA OBLIQUIDADE	
	C' (KPa)	ϕ' (°)	C' (KPa)	ϕ' (°)
01	21,1	27,8	14,6	30,9
02	0,0	36,6	0,0	36,7
03	23,8	24,4	26,7	26,3
04	15,6	32,3	16,3	32,4
AGRUPAMENTO	19,2	29,6	13,8	31,8

Fonte: Autor (2026).

Figura 25 – Ensaio Triaxial CIUsat para as amostras realizadas para o Aterro 1.



Fonte: Autor (2026).

Ademais, embora outros ensaios laboratoriais e de caracterização complementar tenham sido realizados para o mapeamento completo do material, detalhar individualmente cada um deles foge ao escopo específico desta seção. Para fins de modelagem do fluxo e percolação, utilizou-se o intervalo de condutividade hidráulica obtido experimentalmente a partir dessas mesmas amostras ensaiadas, cujo intervalo de variação encontra-se sintetizado na Tabela 2. Desse modo, a permeabilidade adotada para a análise de fluxo no Aterro 1 foi estabelecida com o valor de coeficiente de permeabilidade vertical de $K_v = 4,3 \times 10^{-8}$. A adoção desse valor, posicionado de forma conservadora em relação aos limites medidos, garante maior segurança na estimativa das pressões neutras e da posição da linha freática no interior do maciço.

Em suma, integrando as evidências experimentais compiladas à modelagem computacional no *software Rocscience Slide2D*, as propriedades introduzidas para o Aterro 1 foram configuradas adotando-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas, com peso específico (γ) de 19,3 kN/m³, coesão efetiva (c') de 13,8 kPa, ângulo de atrito efetivo (ϕ) de 31,8° e permeabilidade (K_v) de $4,3 \times 10^{-8}$ m/s.

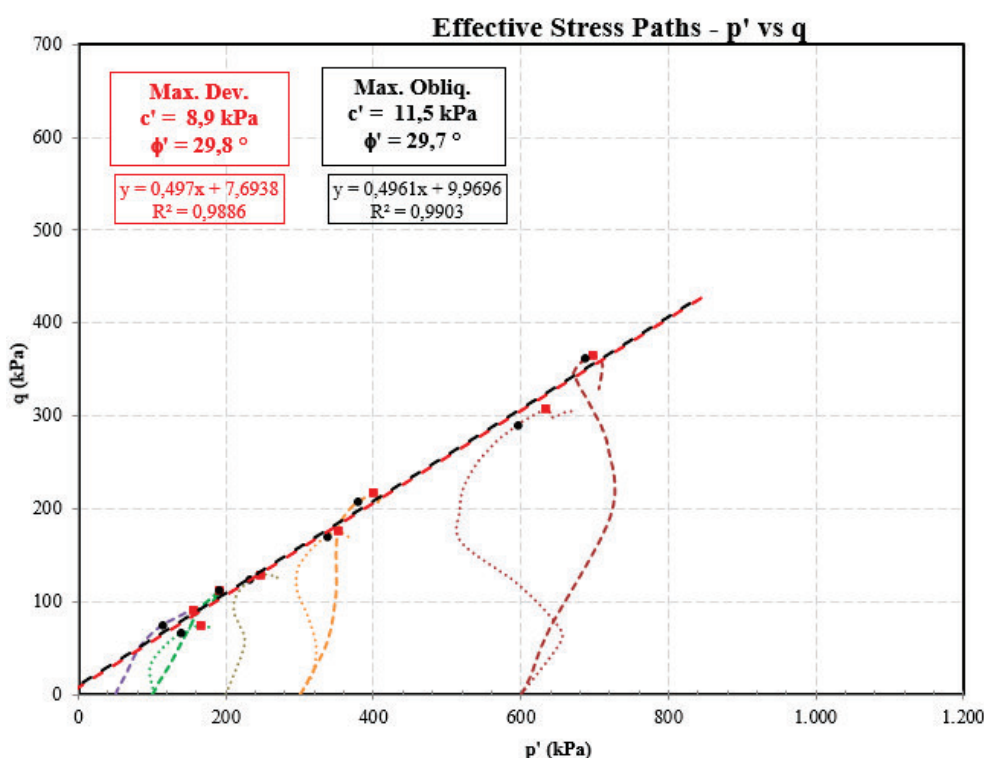
- Aterro 2:

A definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para a modelagem numérica do Aterro 2 foi estabelecida com base na compilação e no tratamento estatístico por agrupamento dos ensaios triaxiais consolidados isotopicamente e não

drenados (CIUsat), conforme apresentado na Tabela 4 e na Figura 26. De forma a manter a uniformidade metodológica e o rigor de análise adotados no trabalho, a escolha da envoltória de resistência para o projeto baseou-se novamente no critério de Máxima Obliquidade das amostras agrupadas. Essa decisão justifica-se pela excelente qualidade do ajuste estatístico obtido no espaço p' x q , onde o coeficiente de determinação para a linha de Máxima Obliquidade alcançou um $R^2 = 0,9903$, superior ao valor de $R^2 = 0,9886$ observado no critério de Máxima Tensão Desviatória. Esse elevado valor de R^2 confere robustez e confiabilidade matemática aos parâmetros gerados, reduzindo as incertezas associadas à dispersão natural dos dados de laboratório.

Sob a ótica do comportamento mecânico e conceitual, a envoltória baseada na Máxima Obliquidade traduz o estado em que a razão entre as tensões cisalhantes e normais efetivas é máxima, representando o ápice da mobilização friccional do material ao longo do plano de ruptura. Para solos compactados e submetidos a ensaios saturados não drenados, como é o caso do Aterro 2, a consideração desse critério assegura uma representação fidedigna dos mecanismos de transferência de tensões e geração de poropressões durante o cisalhamento, aproximando a modelagem do comportamento real em estado crítico.

Figura 26 – Ensaio Triaxial CIUsat para as amostras realizadas para o Aterro 2.



Fonte: Autor (2026).

Tabela 4 – Resultados da Compilação do Ensaio Triaxial CIUsat do Aterro 2.

AMOSTRA	PARÂMETROS EFETIVOS			
	MÁXIMA DESVIATÓRIA		MÁXIMA OBLIQUIDADE	
	C' (KPa)	ϕ' (°)	C' (KPa)	ϕ' (°)
01	3,3	28,9	5,9	28,9
02	17,2	30,2	20,2	30,0
AGRUPAMENTO	8,9	29,8	11,5	29,7

Fonte: Autor (2026).

Adicionalmente, os parâmetros hidráulicos foram definidos de forma a subsidiar as análises de percolação do maciço. Para o desenvolvimento dos modelos de fluxo, adotou-se a condutividade hidráulica saturada obtida experimentalmente a partir dos ensaios realizados nessas mesmas amostras. Conforme configurado no módulo de percolação do *software Rocscience Slide2D* por meio do modelo simplificado, a permeabilidade de projeto para o Aterro 2 foi estabelecida com uma condutividade hidráulica de $K_s = 4,0 \times 10^{-8}$ m/s, permitindo uma estimativa consistente da posição da linha freática e da distribuição das pressões neutras sob regime de fluxo permanente.

Em síntese, a inserção das propriedades geotécnicas do Aterro 2 no modelo computacional seguiu o critério de ruptura de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas, utilizando de forma direta as configurações extraídas das evidências laboratoriais (Figura 26). Desse modo, o comportamento do maciço foi simulado adotando-se um peso específico (γ) de $19,0 \text{ kN/m}^3$, coesão efetiva (c') de $11,5 \text{ kPa}$, ângulo de atrito efetivo (ϕ') de $29,7^\circ$ e coeficiente de permeabilidade saturada (K_s) de $4,0 \times 10^{-8}$ m/s.

- Filtro, Hematitinha e Enrocamento:

As propriedades geotécnicas adotadas para a modelagem numérica dos elementos de comportamento puramente granular — designados no modelo como Filtro, Hematitinha e Enrocamento com finos — basearam-se nas recomendações técnicas e valores de referência consagrados na literatura especializada de engenharia de barragens e estruturas de terra (USBR, 1987; ICOLD, 1994; DAS, 2011). Por se tratarem de materiais estritamente não coesivos, adotou-se para os três elementos a premissa de coesão efetiva nula ($c' = 0 \text{ kPa}$), concentrando a resistência ao cisalhamento integralmente na parcela friccional mobilizada. Os ângulos de atrito efetivos e os pesos específicos foram definidos de forma ponderada e conservadora, situando-se dentro das faixas típicas reportadas na literatura para cada tipologia de material sob condições usuais de disposição e compactação.

Para o elemento de Filtro, estabeleceu-se o peso específico (γ) de 18 kN/m³ e o ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 30°. Esses parâmetros guardam estrita compatibilidade com os índices físicos e de resistência comumente verificados em zonas de transição e drenagem interna, representando uma estimativa segura e posicionada nos limites inferiores para materiais arenosos ou britados mal graduados.

No caso do material denominado Hematitinha, o modelo foi configurado com peso específico (γ) de 25 kN/m³ e ângulo de atrito efetivo (ϕ) de 32°. O elevado valor de peso específico adotado justifica-se por sua composição mineralógica de matriz ferífera, que confere maior densidade aos grãos, enquanto a parcela friccional reflete de maneira conservadora o comportamento esperado para agregados graúdos dessa natureza sem a presença de coesão estrutural.

Por fim, para o Enrocamento com finos, estipulou-se o peso específico (γ) de 20 kN/m³ e o ângulo de atrito efetivo (ϕ) de 35°. Essa parametrização mostra-se condizente com o comportamento mecânico de misturas granulares de grande porte que possuem uma matriz de frações finas interestendidas, onde o intertravamento das partículas graúdas assegura uma resistência friccional ligeiramente superior, mantendo o peso específico dentro dos padrões usuais para maciços de enrocamento compactados.

3.2.3 Definição dos parâmetros estatísticos adotados

Em função da quantidade reduzida de amostras disponíveis para a realização de um tratamento estatístico próprio e estritamente representativo a partir de ensaios locais, optou-se pela adoção de valores de Coeficiente de Variação (CV) consagrados na literatura geotécnica, utilizando como diretriz o intervalo de valores sintetizado na Figura 17. Desse modo, os valores médios de cada propriedade foram incorporados ao modelo com base no processamento e interpretação dos ensaios laboratoriais apresentados anteriormente. A partir desses dados de entrada, os respectivos desvios padrão (σ) foram calculados analiticamente conforme estabelecido na Equação 13, estabelecendo a dispersão teórica esperada para as variáveis de projeto.

Com o objetivo de conferir maior confiabilidade e robustez às análises estatísticas, procedeu-se à variação simultânea de dois parâmetros fundamentais para cada material constituinte da estrutura. No caso do Aterro 1 e do Aterro 2, variou-se a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito efetivo (ϕ'), adotando-se um CV de 20% para a coesão e de 10% para o atrito. Para os materiais granulares, o foco da

variabilidade concentrou-se no peso específico (γ) e no ângulo de atrito efetivo (ϕ'), aplicando-se um CV de 3% para o peso específico tanto do Filtro quanto da Hematitinha, e de 10% para os seus respectivos ângulos de atrito.

Para a modelagem da variabilidade dessas variáveis aleatórias, adotou-se a Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) do tipo Normal para todas as propriedades analisadas. A amplitude dos intervalos de variação foi delimitada utilizando um incremento discreto de 10% baseado no passo estatístico (S), mapeando o comportamento do material de forma simétrica entre os limites inferior e superior definidos pela faixa clássica de três desvios padrão em torno da média ($\mu + 3\sigma$).

Essa configuração assegura a cobertura de 99,73% do universo de dispersão teórica dos dados, correspondente ao intervalo de três desvios padrão em torno da média ($\mu + 3\sigma$) típico da distribuição gaussiana (BAECHER; CHRISTIAN, 2003; DUNCAN, 2000), mitigando o risco de amostragem de valores matematicamente incoerentes e garantindo o rigor científico necessário para subsidiar a etapa subsequente de modelagem probabilística de estabilidade. Nesse sentido, a seguir encontra-se os parâmetros imputados no *Slide 2D* para permitir a execução da análise probabilística.

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos adotados.

Material	Variável	Média	CV (%)	s	Incremento			Variação do parâmetro		FDP
					(%)	S	3 x s	Méd.-(3 x s)	Méd.+(3 x s)	
Aterro 1	c' (kPa)	13,8	20%	2,76	10%	1,38	8,28	5,52	22,08	NORMAL
Aterro 1	ϕ (°)	31,8	10%	3,18	10%	3,18	9,54	22,26	41,34	
Aterro 2	c' (kPa)	11,5	20%	2,3	10%	1,15	6,9	4,6	18,4	
Aterro 2	ϕ (°)	29,7	10%	2,97	10%	2,97	8,91	20,79	38,61	
Filtro	γ (kN/m³)	18	3%	0,54	10%	1,8	1,62	16,38	19,62	
Filtro	ϕ (°)	30	10%	3	10%	3	9	21	39	
Hematitinha	γ (kN/m³)	25	3%	0,75	10%	2,5	2,25	22,75	27,25	
Hematitinha	ϕ (°)	32	10%	3,2	10%	3,2	9,6	22,4	41,6	

Fonte: Autor (2026).

3.2.4 Cenários simulados

A avaliação da estabilidade global da estrutura foi realizada por meio da simulação numérica de 5 (cinco) cenários distintos no *software Rocscience Slide2D*. A concepção desses cenários fundamentou-se nas diretrizes regulatórias vigentes e nas recomendações técnicas de segurança de barragens, visando reproduzir as situações

mais críticas e representativas às quais o maciço pode ser submetido ao longo de sua vida útil. Cumpre ressaltar que as anomalias e estados de falha modelados constituem cenários estritamente hipotéticos desenvolvidos para fins de análise de sensibilidade técnica, não representando a condição física, operacional ou de segurança atual de uma estrutura real.

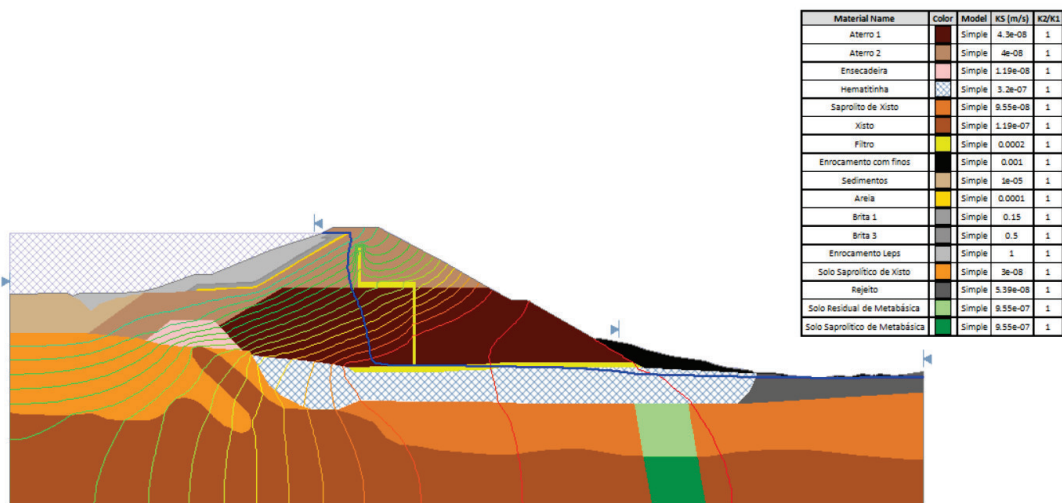
Para cada um dos cenários, foram executadas análises determinísticas e probabilísticas por meio de métodos de equilíbrio limite. A abordagem determinística permitiu a determinação do Fator de Segurança (FS) global regulamentar, enquanto a abordagem probabilística foi utilizada para avaliar o impacto da variabilidade dos parâmetros geotécnicos na probabilidade de ruptura da estrutura, garantindo assim a verificação da conformidade do maciço frente aos critérios mínimos exigidos por norma.

- Cenário 01: Cenário Base.

O Cenário 01 (Figura 27) foi configurado para representar a condição de operação normal da barragem, caracterizando o comportamento rotineiro da estrutura sob regime de fluxo permanente estabelecido. Nesta simulação, assumiu-se a integridade do maciço sob condições ideais, sem a presença de nenhuma anomalia geotécnica, operacional ou estrutural.

Adicionalmente, considerou-se o funcionamento adequado e pleno de todo o sistema de drenagem interna da estrutura, garantindo o controle e o rebaixamento correto da linha freática e a consequente dissipação das pressões neutras no corpo do maciço, conforme previsto no projeto original. Desse modo, este modelo atua como o cenário base de referência da pesquisa, servindo como parâmetro comparativo direto para avaliar o impacto das anomalias e as variações nos níveis de segurança introduzidas nos demais cenários simulados.

Figura 27 – Análise de Percolação para o modelo de cenário base.

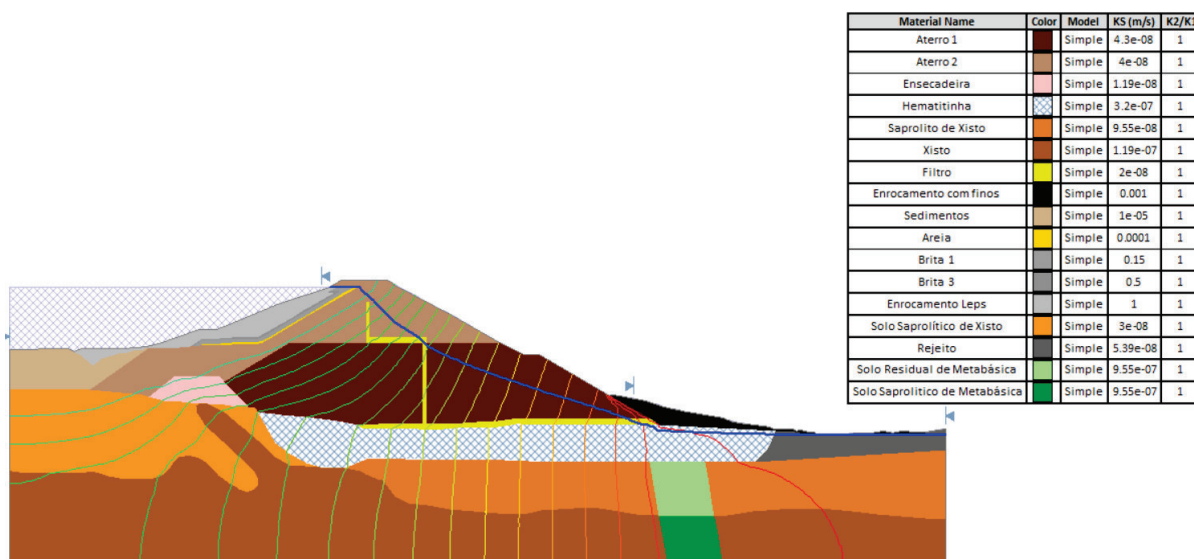


Fonte: Slide 2D (2026).

- Cenário 02: Dreno Colmatado.

O Cenário 02 (Figura 28) foi concebido para avaliar o impacto do mau funcionamento do sistema de drenagem interna da barragem, simulando uma condição de perda de eficiência ou colmatagem do elemento. Para a representação dessa anomalia no módulo de percolação do *software*, a condutividade hidráulica do filtro foi alterada, igualando-a ao mesmo coeficiente de permeabilidade adotado para o material do Aterro 01. Essa abordagem metodológica visa reproduzir fisicamente a obstrução do fluxo, fazendo com que o filtro deixe de atuar como um meio de alívio de pressões neutras. Como consequência direta, essa configuração impede o escoamento projetado e induz a elevação da linha freática, além do consequente incremento das poropressões ao longo do corpo da barragem.

Figura 28 – Análise de Percolação para o modelo de cenário 02.



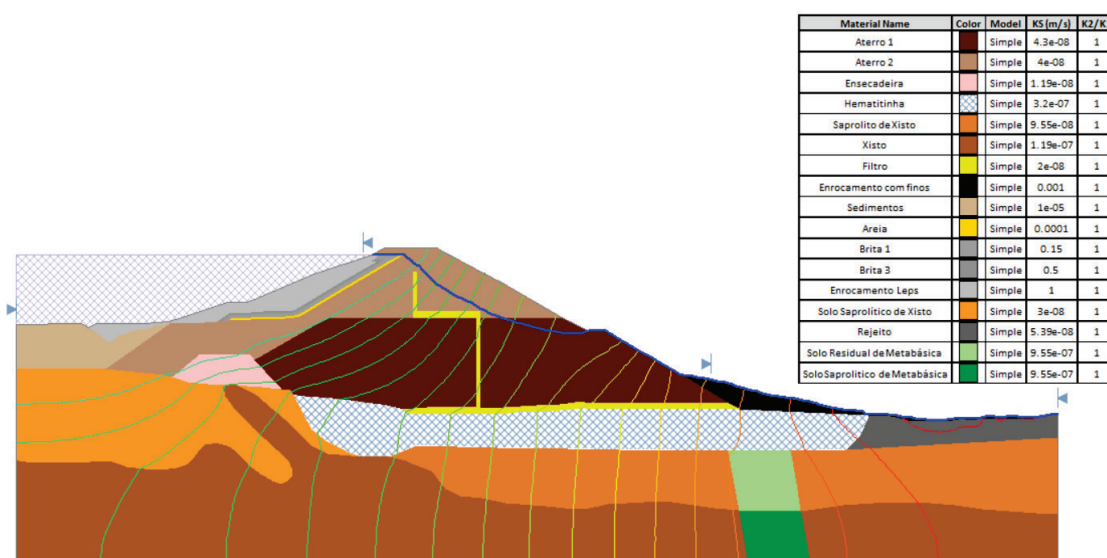
Fonte: Slide 2D (2026).

- Cenário 03: Dreno Colmatado + Surgência.

O Cenário 03 (Figura 29) foi desenvolvido para simular uma condição progressiva de falha hidráulica, combinando a colmatagem do dreno interno à ocorrência de surgência na face do talude. Na modelagem computacional do fluxo, a condutividade hidráulica do elemento filtrante foi mantida igual ao coeficiente de permeabilidade adotado para o Aterro 1, replicando a premissa de obstrução estabelecida no cenário anterior. Adicionalmente, foi introduzida na geometria do modelo uma condição de contorno do tipo pressão neutra nula (*zero pressure*) aplicada ao longo da face exposta do talude. Essa configuração matemática no *software* simula fisicamente o afloramento da água na superfície do maciço, forçando o redirecionamento e a emersão da linha freática diretamente para esse ponto específico da geometria.

Sob a perspectiva da mecânica dos solos, essa restrição impõe que a poropressão (ou pressão neutra) na face externa exposta seja exatamente igual a zero ($u = 0$), o que delimita graficamente a linha de saturação no ponto de saída do fluxo. Como consequência direta desse redirecionamento, toda a porção interna do maciço situada abaixo dessa nova linha de fluxo passa a ser submetida a pressões neutras positivas elevadas, gerando um gradiente hidráulico crítico que empurra a poropressão acumulada em direção à face do talude.

Figura 29 – Análise de Percolação para o modelo de cenário 03.



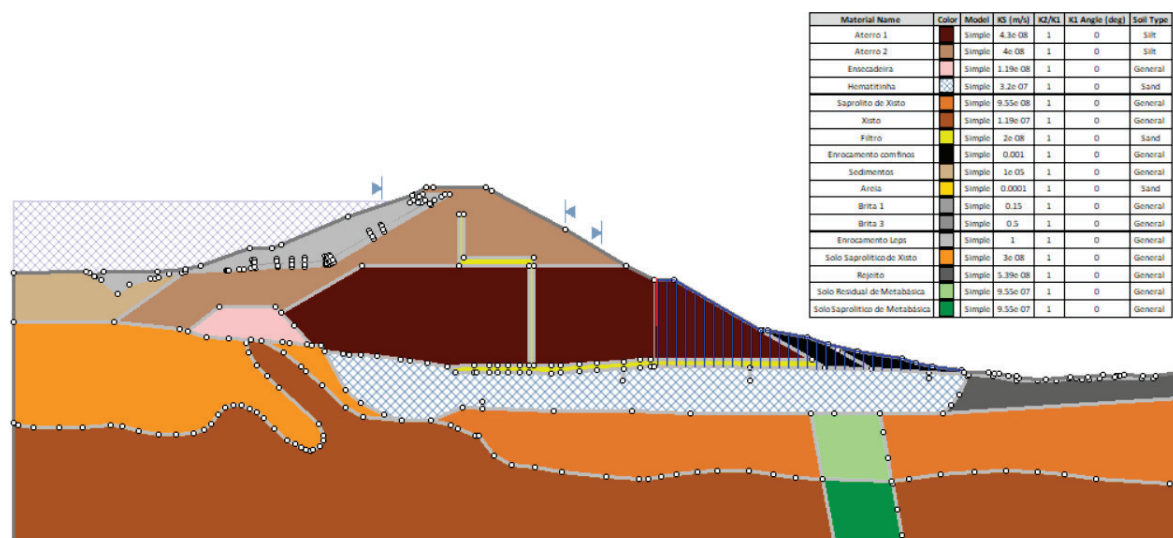
Fonte: *Slide 2D* (2026).

- Cenário 04: Dreno Colmatado + Surgência + Trinca Saturada:

O Cenário 04 (Figura 30) foi delineado para simular o efeito combinado da colmatagem do dreno interno, da ocorrência de surgência na face do talude e do surgimento de uma trinca de tração saturada na região superior do maciço. Para essa simulação, as configurações da linha de fluxo e as condições de contorno de percolação foram mantidas estritamente idênticas às dos cenários anteriores, preservando a condutividade hidráulica do filtro igualada à do Aterro 1 e a restrição de pressão neutra nula (zero pressure) na face exposta.

A descontinuidade estrutural foi representada computacionalmente no *software Rocscience Slide2D* por meio da inserção da ferramenta *Add Tension Crack*, configurando-se o preenchimento total da fenda por água. Sob a perspectiva da mecânica dos solos, essa configuração impõe um duplo efeito desestabilizador ao modelo: anula completamente a resistência ao cisalhamento do material ao longo da profundidade da fenda e induz um empuxo hidrostático horizontal decorrente da pressão da água nas paredes da trinca, atuando de forma direta como uma força motriz que impulsiona a massa de solo em direção à ruptura.

Figura 30 – Modelo adotado para o cenário 04.



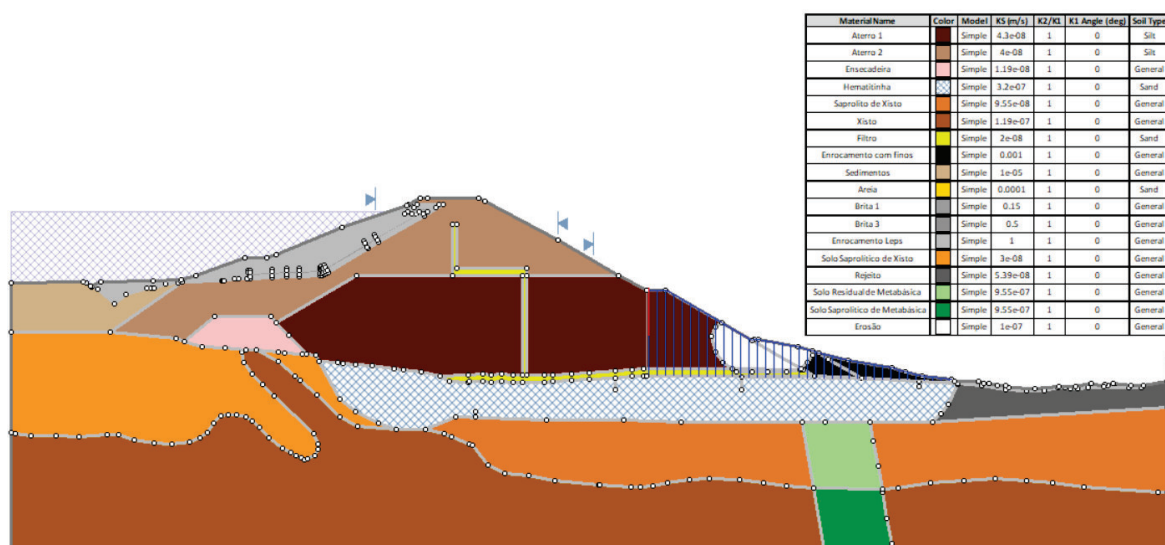
Fonte: Slide 2D (2026).

- Cenário 05: Dreno Colmatado + Surgência + Trinca Saturada + Descontinuidade Geométrica:

O Cenário 05 (Figura 31) foi concebido para representar a condição mais severa e desfavorável de análise, consolidando de forma simultânea todas as anomalias hidráulicas e estruturais precedentes associadas a uma descontinuidade geométrica no pé do talude. Na modelagem computacional, preservaram-se as diretrizes de fluxo dos modelos anteriores — caracterizadas pela colmatagem do dreno e emersão da linha freática na face do maciço — bem como o efeito do empuxo hidrostático gerado pela trinca de tração saturada (*tension crack*).

A introdução da descontinuidade geométrica foi idealizada no *software* mediante a inserção de uma faixa de material com parâmetros de resistência ao cisalhamento estipulados de forma nominal próxima de zero, localizada estrategicamente na região do pé do talude. Do ponto de vista geotécnico, o pé da estrutura desempenha um papel crucial no confinamento e no suporte passivo da massa de solo; portanto, a modelagem dessa zona de fraqueza extrema simula mecanismos críticos como o amolecimento localizado do material ou planos de falha preexistentes

Figura 31 – Modelo adotado para o cenário 05.



Fonte: Slide 2D (2026).

3.2.5 Configuração da modelagem determinística (Slide 2D)

A análise determinística do talude de jusante foi executada no *software Rocscience Slide2D* utilizando superfícies de ruptura não circulares, cuja busca geométrica foi otimizada pelo algoritmo global *Cuckoo Search*. Para a modelagem da seção que incorpora a trinca de tração, utilizou-se a busca por superfícies não circulares associada ao método de otimização *Auto Refine Search*. Enquanto o algoritmo metaheurístico *Cuckoo Search* foi capaz de mapear eficientemente as superfícies poligonais de ruptura nas seções íntegras do maciço, a introdução da trinca como uma descontinuidade geométrica e de pressões neutras gerou uma região de alta singularidade e concentração de tensões no modelo.

Diante dessa condição anômala, o método *Auto Refine* mostrou-se tecnicamente necessário por apresentar maior estabilidade e robustez numérica. Esse algoritmo permitiu que os vértices da linha de ruptura não circular se ajustassem de maneira sistemática e precisa à base da trinca, contornando a descontinuidade sem gerar erros de não-convergência ou instabilidades matemáticas nos cálculos determinísticos e probabilísticos associados a este cenário.

A análise de estabilidade global por meio de superfícies não circulares no *software Rocscience Slide2D* podem ser conduzidas por diferentes estratégias matemáticas de otimização, destacando-se o método *Auto Refine Search* e o algoritmo *Cuckoo Search*. O método *Auto Refine Search* atua de forma local e sistemática, gerando uma superfície poligonal inicial e criando janelas de refinamento

ao redor de seus vértices nas regiões onde são identificados os menores fatores de segurança, estreitando a busca de maneira estruturada a cada iteração até a convergência final.

Por outro lado, o *Cuckoo Search* fundamenta-se em um algoritmo metaheurístico de otimização global de inteligência coletiva, inspirado no comportamento reprodutivo dos pássaros cucos. Este método lança simultaneamente diversas superfícies poligonais aleatórias ao longo de toda a geometria do talude e emprega formulações matemáticas baseadas em voos de Lévy para descartar as soluções menos eficientes e gerar novas tentativas próximas aos caminhos mais críticos. Enquanto o *Cuckoo Search* se destaca na varredura global de superfícies livres em taludes homogêneos, o rigor geométrico do *Auto Refine* o torna superior e mais estável para lidar com modelos que contêm restrições físicas localizadas e descontinuidades bruscas.

Os cálculos de estabilidade foram processados simultaneamente por três métodos rigorosos de equilíbrio limite: Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Sarma (1973). A escolha dessas metodologias justifica-se pelo elevado rigor matemático, visto que, diferentemente de formulações simplificadas como as de Bishop ou Fellenius, os métodos de Morgenstern-Price e Spencer satisfazem integralmente todas as condições de equilíbrio estático de forças e de momentos entre as lamelas (DUNCAN; WRIGHT, 2005). Complementarmente, o método de Sarma (1973) foi incorporado por sua precisão analítica no tratamento de cinemáticas de falha não circulares complexas.

No cenário atual da engenharia consultiva e em auditorias de segurança conduzidas pelo Engenheiro de Registro (EoR), o emprego exclusivo de métodos rigorosos tornou-se um requisito, uma vez que abordagens simplificadas tendem a superestimar perigosamente o Fator de Segurança (FS) ao negligenciar a transferência de tensões tangenciais internas no maciço.

Adicionalmente, as diretrizes de cálculo no *Project Settings* do *software* foram refinadas para garantir a convergência numérica e a aderência física do modelo geométrico. Definiu-se o sentido de movimentação e progressão da ruptura da esquerda para a direita (*Left to Right*), acompanhando a orientação espacial do talude de jusante analisado. A massa deslizante foi discretizada em 50 lamelas verticais, limite este adequado para assegurar o correto funcionamento dos métodos rigorosos de equilíbrio limite. O acoplamento das pressões neutras geradas nos cenários de

fluxo foi realizado por meio do método de elementos finitos em regime permanente (*Steady-State FEA*), integrando a malha de percolação diretamente à análise de estabilidade. Ademais, fixou-se o critério de tolerância para a convergência matemática dos fatores de segurança em 0,005, com um limite máximo de 75 iterações numéricas por superfície pesquisada.

Por fim, a definição dos limites de busca de superfícies no *software* foi configurada de maneira estratégica para restringir a iniciação e o término das linhas de ruptura estritamente ao longo do talude de jusante da estrutura. O posicionamento desses limites teve como objetivo direcionar os algoritmos de otimização para a identificação de uma cunha de ruptura global, evitando o processamento de cunhas locais ou superficiais no topo ou no pé do talude. Essa restrição geométrica justificou-se pela necessidade de avaliar o cenário mais crítico e representativo para a estabilidade geral do maciço, garantindo que tanto a modelagem determinística quanto a construção da superfície de resposta refletissem fielmente o comportamento mecânico global da seção frente às anomalias simuladas.

3.2.6 Configuração da modelagem probabilística (*Slide 2D*)

Para a execução da etapa probabilística, todas as diretrizes geométricas, condições de contorno de percolação e parametrizações determinísticas previamente estabelecidas — incluindo a busca não circular e os métodos rigorosos de equilíbrio limite — foram integralmente mantidas e associadas à rotina estatística do *Rocscience Slide2D* através da ativação do módulo *Probabilistic Analysis*.

Para a realização das análises probabilísticas e a determinação da probabilidade de ruptura do maciço, optou-se pela exclusão do método de Sarma devido à sua incompatibilidade em termos de eficiência e convergência computacional quando associado ao método da Superfície de Resposta (RSM). O método da Superfície de Resposta baseia-se na aproximação da função de performance do talude por meio de um número otimizado de simulações numéricas estratégicas.

Contudo, a formulação matemática do método de Sarma, que considera o equilíbrio de forças internas verticais e inclinadas para superfícies não circulares, resultou em um tempo de processamento excessivamente elevado e em dificuldades de convergência para os pontos de amostragem gerados pelo algoritmo probabilístico. Diante disso, a descontinuação do uso do método de Sarma justificou-se pela necessidade de garantir a estabilidade numérica e a viabilidade operacional na

construção da superfície de resposta, assegurando a precisão na estimativa da probabilidade de ruptura através dos demais métodos rigorosos de equilíbrio limite.

Como estratégia computacional de amostragem, adotou-se o Método da Superfície de Resposta (*Response Surface Method*), configurado com um número de amostras (Number of Samples) fixado em 1000 iterações. A escolha dessa metodologia justifica-se por sua elevada eficiência em problemas de estabilidade de taludes, uma vez que o algoritmo otimiza o tempo de processamento ao aproximar a função de estado limite real por meio de polinômios matemáticos, garantindo alta convergência e robustez estatística mesmo com um número controlado de amostras.

Por fim, o tipo de análise (*Analysis Type*) foi definido predominantemente como estabilidade global do talude (*Overall Slope*). Essa diretriz assegura que a variabilidade dos parâmetros estatísticos inseridos (médias e desvios padrão) seja testada ao longo de todo o corpo do maciço de jusante, avaliando a oscilação do Fator de Segurança mínimo global e permitindo o cálculo preciso da Probabilidade de Ruptura (Pr) e do Índice de Confiabilidade para os cenários propostos.

Contudo, especificamente para o Cenário 04, a configuração de busca foi alterada para o método do Mínimo Global (*Global Minimum*) devido a severas restrições e condições de não-convergência numérica apresentadas pelo modelo durante as iterações probabilísticas da Superfície de Resposta. Essa adequação pontual mostrou-se estritamente necessária para garantir a estabilidade matemática dos cálculos e viabilizar a convergência das simulações sem comprometer a representatividade física e a avaliação comparativa da seção sob análise.

4 RESULTADOS

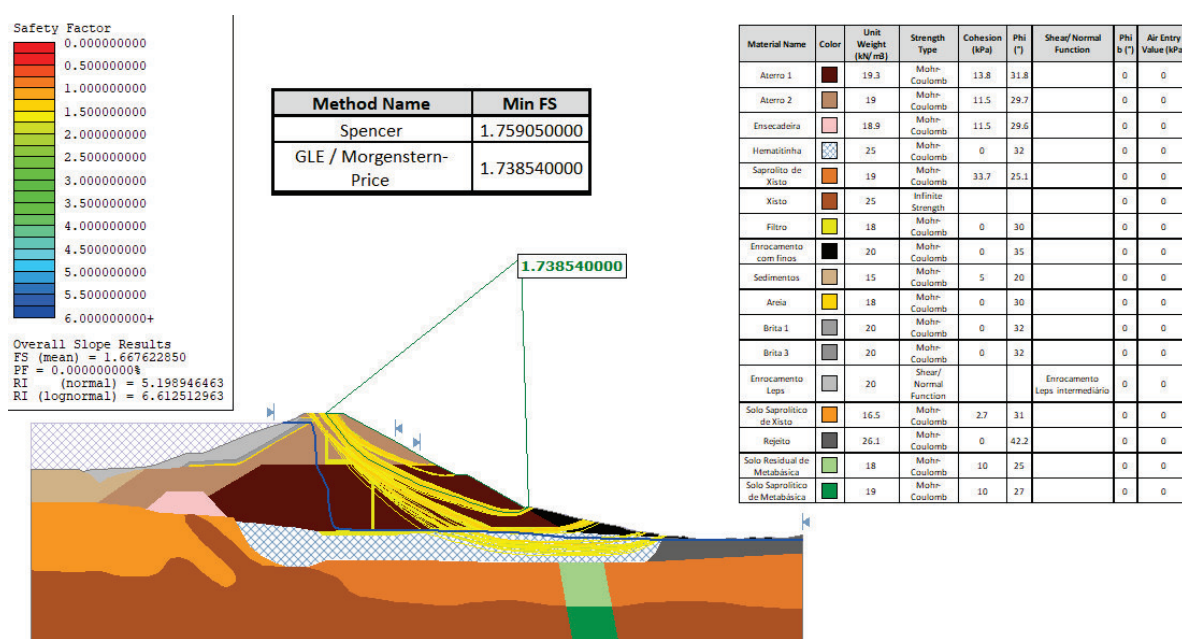
Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir das simulações numéricas de estabilidade global realizadas para o talude de jusante da estrutura.

4.1 ANÁLISE DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA

- Cenário 01: Cenário Base:

A Figura 32 indica o resultado obtido na análise simulada através do *software Slide 2D*, para o cenário de operação normal da estrutura.

Figura 1 – Resultado do Cenário 01.



Fonte: Slide 2D (2026).

A superfície de ruptura crítica gerada pelo modelo apresenta um caráter profundo, interceptando o corpo do aterro (Aterro 1 e Aterro 2), atravessando a região do filtro e vindo a tangenciar a camada de fundação antes de emergir no pé do talude de jusante. O menor Fator de Segurança obtido ($FS = 1,74$) atende com margem segura aos critérios normativos estipulados pela ABNT NBR 13028-2 (ABNT, 2024) e referendados legalmente pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), que exigem um valor mínimo de 1,50 para cenários de carregamento de longo prazo sob condições normais de operação.

Complementarmente, a análise probabilística associada ao modelo indicou uma Probabilidade de Ruptura (Pf) de 0,0000%, com um Índice de Confiabilidade (RI) de 5,20 para a distribuição normal. Esses índices de confiabilidade reforçam a robustez

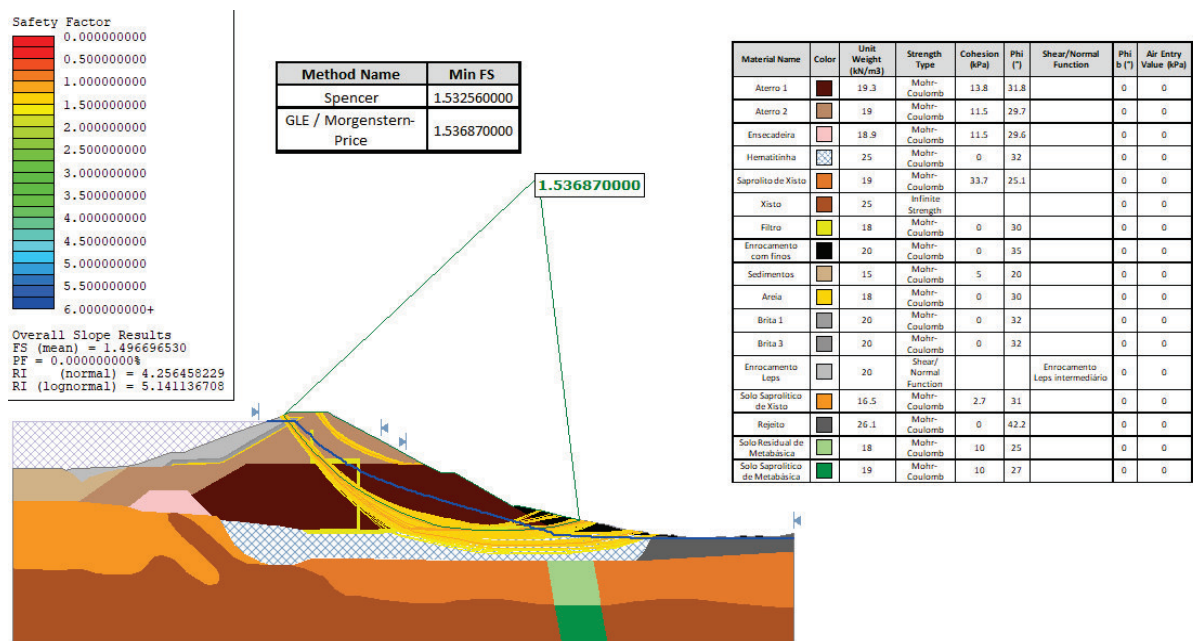
estrutural da seção sob as premissas adotadas, confirmando que a estrutura se encontra em condições geotécnicas estáveis e sem indícios de criticidade quanto a mecanismos de ruptura global pelo talude de jusante.

De acordo com as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024), a avaliação de segurança na fase de projeto e operação de barragens deve assegurar a estabilidade física da estrutura frente a mecanismos críticos de falha inerentes à sua condição normal de carregamento, devendo-se prever análises para o risco de estabilidade dos taludes, galgamento, erosão interna e, se aplicável, liquefação.

- Cenário 02: Dreno Colmatado:

A Figura 33 indica o resultado obtido na análise simulada através do *software Slide 2D*, para o cenário da estrutura com o dreno colmatado.

Figura 33 – Resultado do Cenário 02.



Fonte: *Slide 2D* (2026).

A falha do sistema de drenagem interna é tratada na literatura como um mecanismo crítico de instabilidade. Al-Yaqoubi et al. (2024) explicam que a obstrução (colmatagem) dos drenos de pé impacta negativamente o regime de fluxo, forçando a elevação da linha freática e causando um acréscimo generalizado das pressões neutras no interior do aterro. Complementarmente, Massad (2010) adverte que a ineficiência hidráulica decorrente do bloqueio gradual dos filtros ao longo do tempo configura uma das principais causas de ruptura macroscópica em obras de terra.

A colmatagem do sistema de drenagem provocou uma redução sensível no Fator de Segurança global da seção, decrescendo de cerca de 1,74 (no Cenário Base) para

aproximadamente 1,54. Sob a ótica clássica da Mecânica dos Solos, essa perda de estabilidade é explicada diretamente pelo Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi (Equação 12). À medida que o dreno perde capacidade de vazão, o nível d'água ascende e satura zonas do Aterro 1 e Aterro 2 que antes operavam em condições não saturadas, gerando um aumento substancial nas pressões neutras (u) ao longo da massa de solo.

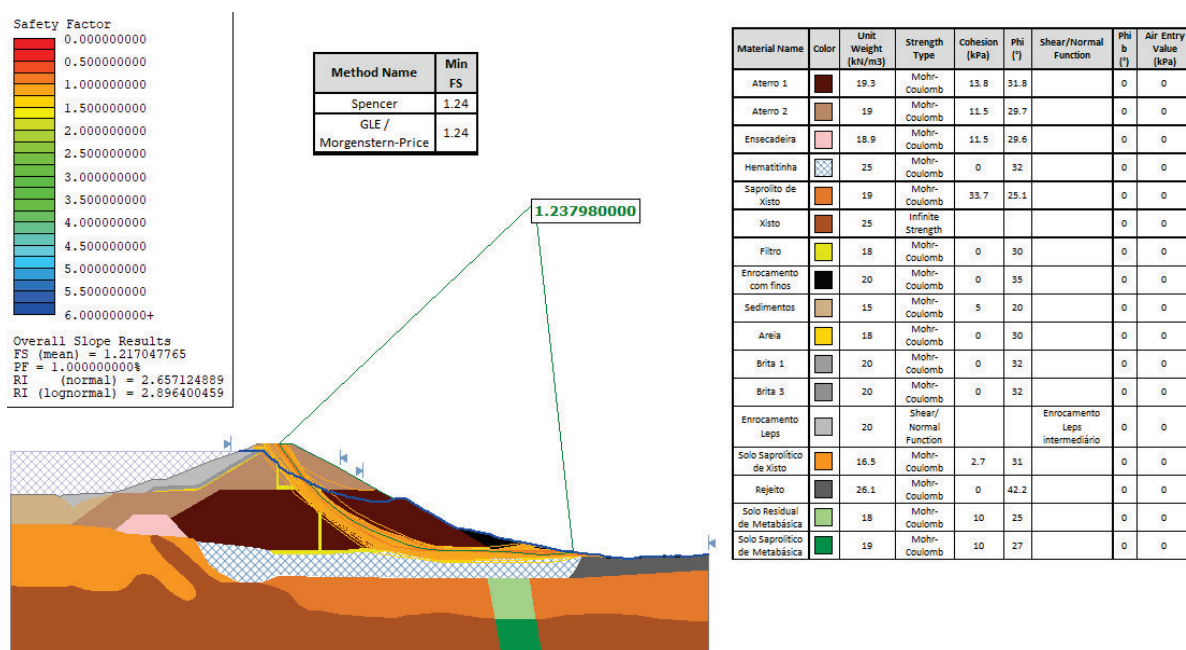
Esse incremento na poropressão reduz diretamente a tensão efetiva atuante nos contatos entre as partículas minerais do solo, o que provoca uma queda imediata na resistência ao cisalhamento disponível ao longo da superfície de deslizamento, conforme dita o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 9). Somado a isso, o estabelecimento de um gradiente hidráulico elevado em direção à face de jusante introduz forças de percolação (forças de arrasto que a água exerce sobre as partículas sólidas), as quais atuam como um vetor desestabilizador extra no balanço de forças do modelo.

No entanto, apesar da severidade do cenário hidrodinâmico e da redução na rigidez do maciço, o menor Fator de Segurança obtido ($FS = 1,54$) permanece superior ao limite de 1,30, critério normativo recomendado pela ABNT NBR 13028 para cenários de contingência ou acidentais de curto prazo. Essa margem de segurança é corroborada pela análise probabilística, que indicou uma Probabilidade de Ruptura (P_f) residual de 0,0000% e Índices de Confiabilidade (RI) de 4,26 (distribuição normal), confirmando que o barramento preserva sua integridade estrutural global mesmo sob essa condição hipotética degradada.

- Cenário 03: Dreno Colmatado + Surgência.

A Figura 34 indica o resultado obtido na análise simulada através do *software Slide 2D*, para o cenário da estrutura com o dreno colmatado e surgência na face do talude de jusante.

Figura 34 – Resultado do Cenário 03.



Fonte: Slide 2D (2026).

A evolução da falha na drenagem não se restringe apenas ao interior do maciço, manifestando-se externamente de forma perigosa. Conforme os estudos de El-Molla (2026), o bloqueio crônico do sistema drenante é evidenciado em campo pelo desenvolvimento de áreas de exsudação (surgências) na face de jusante, associadas à redução do fluxo que efetivamente sai pelo dreno e à elevação anômala das pressões neutras na região.

A associação da colmatagem do dreno com a ocorrência de surgência na face do talude provocou uma redução drástica e alarmante no Fator de Segurança global, que decaiu para 1,24, modificando também a geometria da superfície crítica, que se tornou mais rasa e concentrada na porção inferior do talude de jusante (Aterro 1 e Aterro 2). Sob as premissas da Mecânica dos Solos, esse comportamento altamente desfavorável é o resultado direto da saturação quase completa do prisma de jusante e do estabelecimento de um fluxo de percolação paralelo e à face do talude.

A elevação máxima da linha freática gera pressões neutras (u) extremamente elevadas na base e no corpo do aterro, reduzindo a níveis críticos a tensão efetiva de Terzaghi e, conseqüentemente, deprimindo a resistência ao cisalhamento disponível ao longo do plano potencial de ruptura. Adicionalmente, o vetor do gradiente hidráulico na zona de afloramento gera forças de percolação (forças de arrasto) que atuam no mesmo sentido do movimento de massa em potencial, exercendo uma força de

empuxo hidrodinâmico para fora do talude que reduz a estabilidade confinante do pé da estrutura.

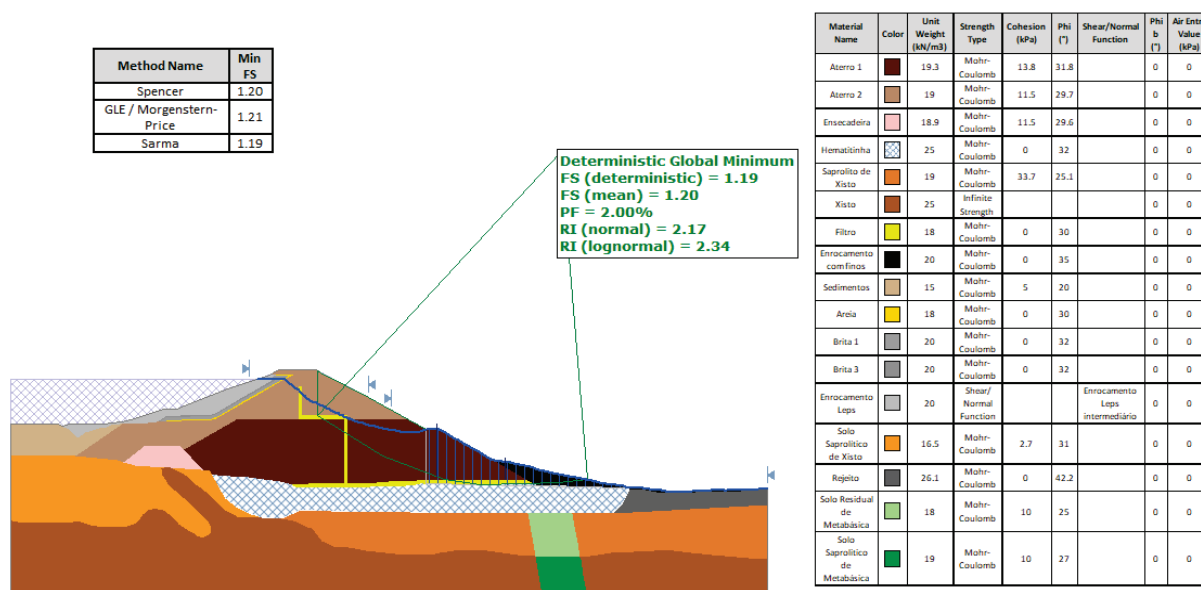
Sob o ponto de vista normativo, o fator de segurança obtido ($FS = 1,24$) encontra-se abaixo do limite mínimo de 1,50 preconizado pela versão atualizada da ABNT NBR 13028-2 (ABNT, 2024) e pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), configurando uma situação de severa não conformidade e risco potencial de instabilidade física. Esse cenário crítico é categoricamente confirmado pelos indicadores probabilísticos do modelo, nos quais a Probabilidade de Ruptura (P_f) saltou para 1,0000% (0,01) e os Índices de Confiabilidade (RI) despencaram para 2,66 (distribuição normal).

Ao confrontar esses resultados com os níveis de aceitação estipulados pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1995), observa-se que o índice calculado situa o nível de desempenho esperado do barramento ligeiramente acima do patamar "Abaixo da Média" ($\beta = 2,5$), enquanto a probabilidade de desempenho insatisfatório ($P_f = 0,01$) enquadra a estrutura de forma estrita em uma faixa de transição desfavorável entre os níveis "Abaixo da Média" (0,006) e "Ruim" (0,023), evidenciando a perda severa de confiabilidade do maciço e a urgência na implementação de ações de controle do nível freático e intervenções emergenciais de remediação hidráulica.

- Cenário 04: Dreno Colmatado + Surgência + Trinca Saturada:

A Figura 35 indica o resultado obtido na análise simulada através do *software Slide 2D*, para o cenário da estrutura com o dreno colmatado, surgência na face do talude de jusante e a presença de trinca saturada.

Figura 35 – Resultado do Cenário 04.



Fonte: Slide 2D (2026).

O impacto da falha nos sistemas de drenagem estende-se à integridade mecânica global da estrutura. Como demonstrado por Dey e Talukdar (2022), a drástica alteração no fluxo de água impõe tensões adicionais que podem induzir deformações severas, chegando a provocar o trincamento e o cisalhamento das camadas de fundação e do próprio corpo do maciço.

A introdução da trinca de tração saturada reduziu ainda mais o Fator de Segurança global (decaindo para o mínimo de 1,19) e alterou sensivelmente o mecanismo de ruptura, cuja superfície crítica agora se inicia de forma vertical no fundo da descontinuidade hidrodinâmica. Sob a ótica fundamental da Mecânica dos Solos, esse agravamento é justificado por dois efeitos simultâneos deletérios ao equilíbrio de forças do talude. Primeiramente, a abertura da trinca anula completamente a resistência ao cisalhamento que seria mobilizada pelo solo naquela porção inicial da massa deslizante, reduzindo o comprimento efetivo do plano de ruptura capaz de resistir ao movimento.

Em segundo lugar, o preenchimento da trinca por água gera um empuxo hidrostático lateral (pressão hidrostática) que atua diretamente nas paredes da fenda, injetando uma força horizontal desestabilizadora de grande magnitude orientada no sentido do movimento de massa. Esse empuxo soma-se às pressões neutras (u) já elevadas decorrentes do dreno colmatado — que reduzem a tensão efetiva de Terzaghi ao longo da base do aterro — e às forças de percolação da surgência,

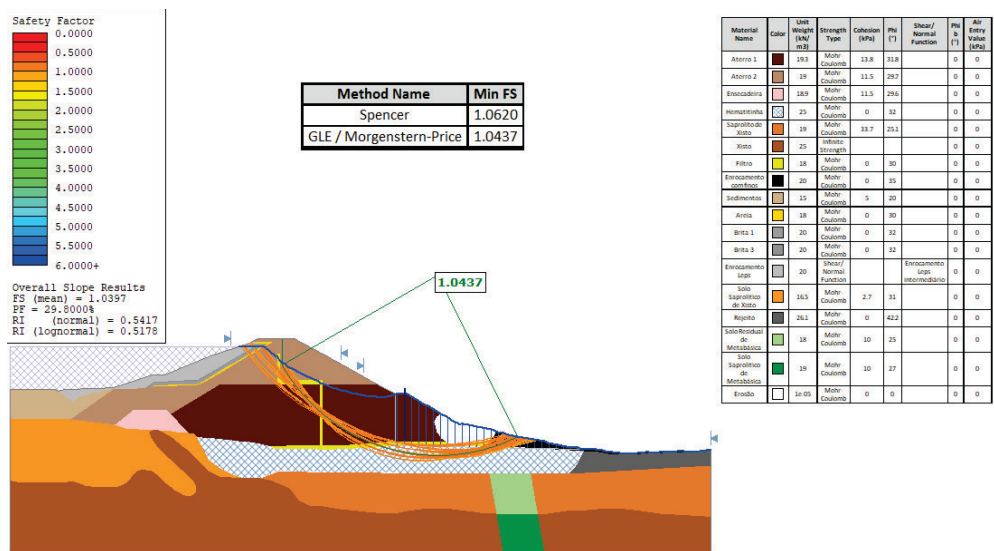
criando um quadro de severa instabilidade. Sob a ótica regulatória, o fator de segurança de 1,19 viola frontalmente o limite mínimo de 1,50 estabelecido pela ABNT NBR 13028-2 (ABNT, 2024) e pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022) para condições estáticas, consolidando uma situação de iminente criticidade operacional.

No âmbito probabilístico, o cenário se consolida como desfavorável: a Probabilidade de Ruptura (Pf) dobrou em relação ao cenário anterior, atingindo 2,0000% (0,02), enquanto os Índices de Confiabilidade (RI) retrocederam para 2,17 (distribuição normal). Ao confrontar esses indicadores com os níveis de aceitação do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1995), a estrutura é reenquadrada de forma inequívoca na categoria "Ruim" (Poor), cujos limites de controle estipulam um $\beta = 2,0$ associados a uma probabilidade de desempenho insatisfatório de 0,023. Desse modo, o diagnóstico probabilístico e determinístico aponta para a necessidade compulsória de ações imediatas de alívio de poropressões, selagem de trincas e rebaixamento do lençol freático para impedir a evolução do mecanismo para uma ruptura macroscópica.

- Cenário 05: Dreno Colmatado + Surgência + Trinca Saturada + Descontinuidade Geométrica:

A Figura 36 indica o resultado obtido na análise simulada através do *software Slide 2D*, para o cenário da estrutura com o dreno colmatado, surgência na face do talude de jusante, trinca saturada e a presença de uma descontinuidade geométrica local no pé do talude.

Figura 36 – Resultado do Cenário 05.



Fonte: Slide 2D (2026).

Diante da complexidade de um cenário crítico e cumulativo de falhas, a adoção exclusiva de laudos estáticos pode ser insuficiente para traduzir o risco real da estrutura. Vecchi (2018) adverte que negligenciar a variabilidade e as incertezas dos parâmetros do solo conduz a avaliações de segurança pouco confiáveis. Como as normas ainda não fixam valores unificados para análises probabilísticas, a autora esclarece que os limites de confiabilidade aceitáveis devem ser estipulados tendo em vista os custos operacionais e as possíveis perdas humanas e econômicas inerentes a um eventual colapso do barramento.

A inclusão da descontinuidade geométrica por erosão atuando em conjunto com a trinca saturada e a linha freática aflorante reduziu o Fator de Segurança global ao limiar da ruptura ($FS = 1,04$). Sob a perspectiva fundamental da Mecânica dos Solos, o impacto drástico dessa descontinuidade decorre da remoção física de solo na porção inferior e intermediária do talude de jusante. Em termos práticos, o pé e a face inferior do talude atuam como o principal bloco de empuxo passivo ou massa estabilizadora do sistema; ao sofrer uma perda de geometria por erosão, a estrutura perde o suporte confinante que resiste ao momento rotacional ou translacional da massa deslizante. Esse alívio de peso geométrico desfavorável coincide exatamente com a região onde as pressões neutras (u) estão maximizadas devido ao dreno colmatado e à surgência, anulando a tensão efetiva de Terzaghi e exaurindo a resistência ao cisalhamento disponível.

Sob a ótica regulatória, o fator de segurança de 1,04 viola de forma absoluta o limite mínimo de 1,50 exigido pela ABNT NBR 13028-2 (ABNT, 2024) e pela Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), enquadrando o barramento em um estado de emergência técnica extrema (nível de alerta máximo). Essa iminência de colapso é corroborada de forma inequívoca pelos indicadores probabilísticos, nos quais a Probabilidade de Ruptura (P_f) saltou para expressivos 29,8000% e os Índices de Confiabilidade (β ou RI) despencaram para patamares nulos de 0,54 (distribuição normal).

Ao confrontar esses dados com as diretrizes do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 1995), a estrutura rompe os limites inferiores da tabela de aceitação, situando-se muito além da categoria "Perigoso" (*Hazardous*, $\beta = 1,0$; $P_f = 0,16$). Com uma confiabilidade próxima de zero e onde praticamente 1 em cada 3 configurações de parâmetros resulta em falha física, o diagnóstico impõe a necessidade imediata de

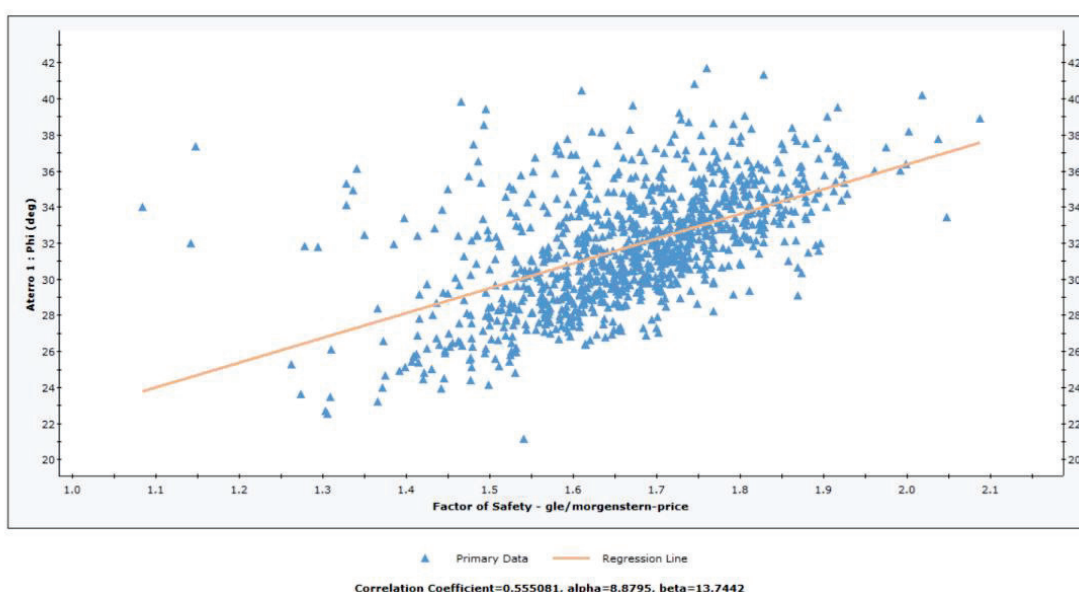
acionamento do plano de contingência, evacuação e intervenções estruturais de alta urgência para conter o colapso macroscópico da barragem.

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS

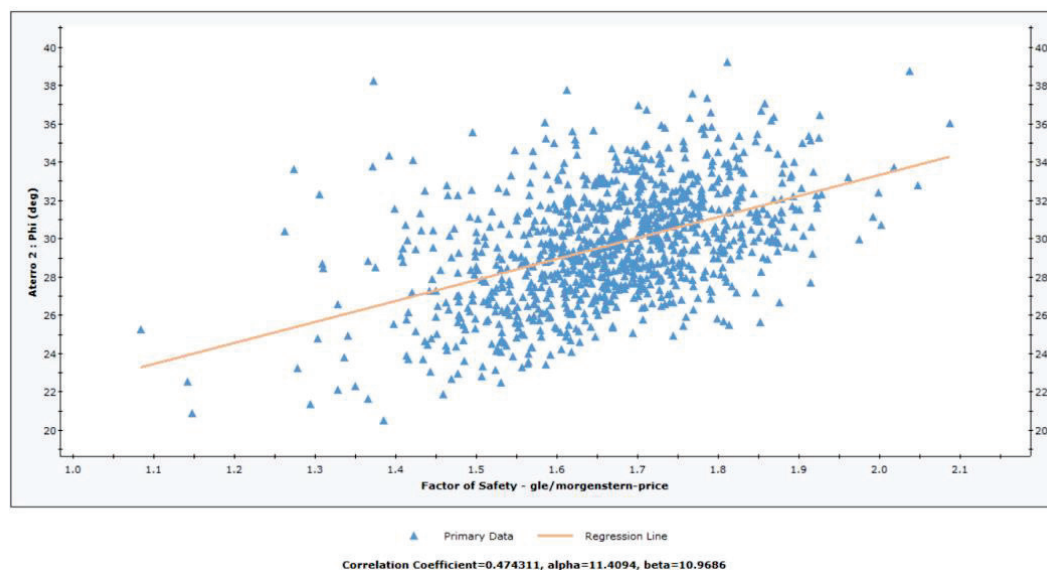
Para avaliar a influência das incertezas dos parâmetros de resistência dos materiais no Fator de Segurança (FS), realizou-se uma análise de sensibilidade global por meio do cálculo dos Coeficientes de Correlação (CC). Com o intuito de conferir maior concisão ao texto e evitar redundâncias gráficas, optou-se por apresentar os diagramas de dispersão apenas para os parâmetros de maior criticidade estatística, uma vez que o comportamento das demais variáveis manteve um padrão de sensibilidade análogo e de menor magnitude.

No Cenário Base (Operação Normal), constatou-se que a variabilidade do FS é governada de forma majoritária pelo ângulo de atrito interno (ϕ) dos materiais do corpo da barragem, especificamente o Aterro 1 e o Aterro 2, os quais apresentaram os maiores valores de CC. Sob a perspectiva mecânica, esse comportamento se justifica pelo fato de que, na ausência de anomalias hidráulicas, a superfície crítica de ruptura intercepta predominantemente o maciço compactado de jusante, tornando a resistência friccional dessas camadas o principal mecanismo estabilizador da estrutura.

Figura 37 – Interferência do ϕ do Aterro 1 no resultado do Cenário Base



Fonte: Slide 2D (2026).

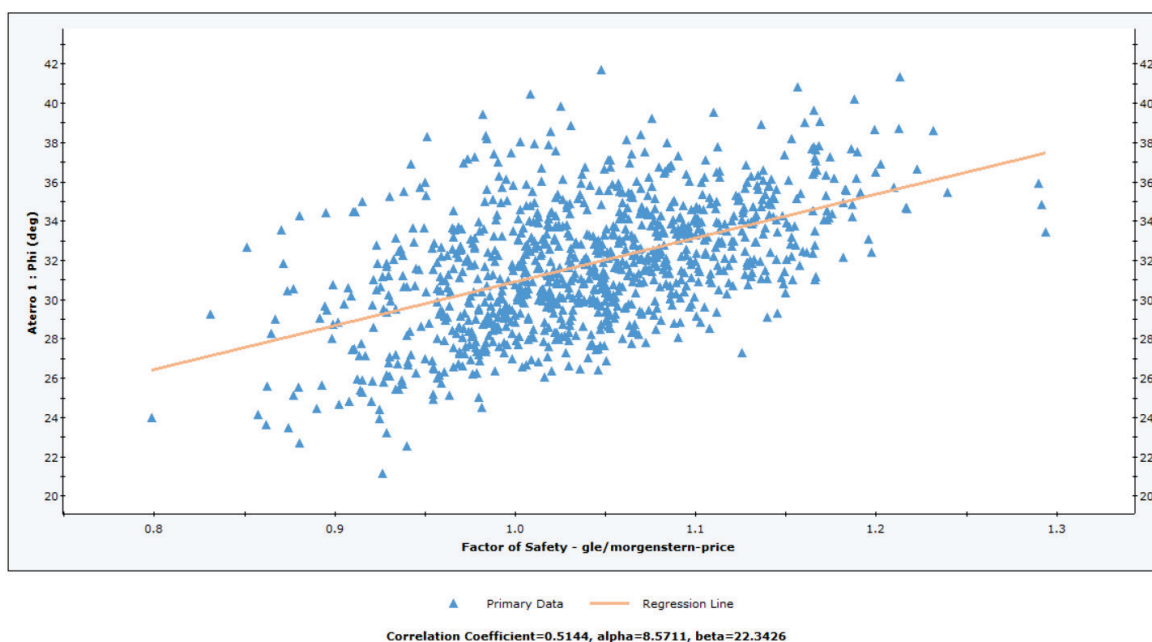
Figura 38 – Interferência do ϕ do Aterro 2 no resultado do Cenário Base

Fonte: Slide 2D (2026).

Por outro lado, nos Cenários de Anomalia (envolvendo colmatagem do dreno, surgência, trincas saturadas e descontinuidades geométricas), observa-se um claro deslocamento na sensibilidade do modelo: o FS passa a ser controlado de maneira estrita pelos ângulos de atrito do Aterro 1 e da Hematitinha, que passam a apresentar os maiores coeficientes de correlação linear. Sob a ótica da Mecânica dos Solos, essa mudança reflete diretamente a alteração na cinemática e na geometria do mecanismo de ruptura potencial sob condições hidráulicas severas.

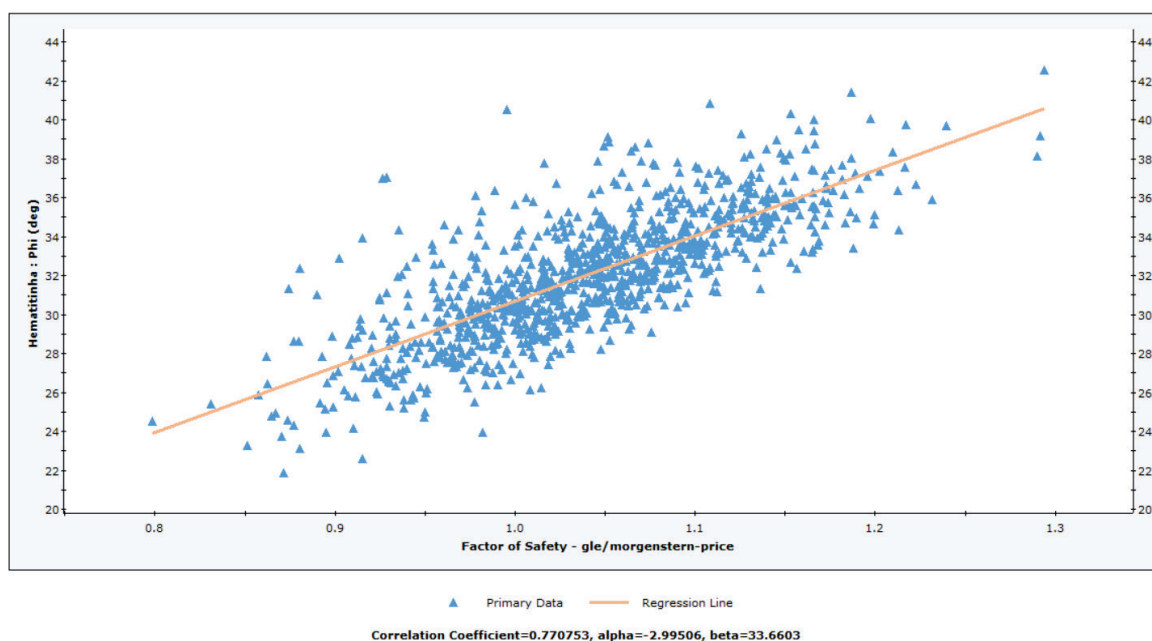
À medida que a linha freática se eleva e ocorrem perda de seção geométrica (erosão) e tração na crista, o plano de ruptura se consolida de forma profunda através do coração do maciço inferior (Aterro 1) e passa a se estender e deslizar ao longo da interface com a camada de fundação (Hematitinha). Dessa forma, como a superfície de falha passa a cisalhar predominantemente o Aterro 1 sob altas poropressões e a se apoiar na base de Hematitinha, a resistência ao cisalhamento desses dois materiais específicos passa a ditar a estabilidade ou o colapso iminente da seção, tornando-os os alvos mais críticos para ensaios de caracterização e monitoramento instrumental.

Figura 39 – Interferência do ϕ do Aterro 1 no resultado do cenário mais crítico.



Fonte: Slide 2D (2026).

Figura 40 – Interferência do ϕ da Hematitinha no resultado do cenário mais crítico.



Fonte: Slide 2D (2026).

4.3 CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 6 expõe os Fatores de Segurança (FS) determinísticos calculados via métodos de limite equilíbrio de Morgenstern-Price, Spencer e Sarma, evidenciando o impacto de cada evento na redução da margem de segurança regulamentar. Complementarmente, a Tabela 7 compila os parâmetros estatísticos resultantes da

abordagem probabilística, destacando o comportamento da estrutura sob a ótica da variabilidade dos materiais por meio do Fator de Segurança médio e mínimo, desvio padrão, Índice de Confiabilidade (β) e Probabilidade de Falha (Pf), servindo como base para as interpretações físicas fundamentadas na mecânica dos solos discutidas na sequência.

Tabela 6 – Resultados da Análise Determinística para cada cenário simulado.

Cenário	RESULTADOS			REDUÇÃO DA MARGEM DE SEGURANÇA		
	Morgenstern - Price	Spencer	Sarma	Morgenstern - Price	Spencer	Sarma
CENÁRIO 01: BASE	1,74	1,76	1,76	-	-	-
CENÁRIO 02: COLMATAÇÃO DO DRENO	1,54	1,53	1,53	27,03%	30,26%	30,26%
CENÁRIO 03: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA	1,24	1,24	1,23	67,57%	68,42%	69,74%
CENÁRIO 04: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA + TRINCA SATURADA	1,21	1,20	1,19	71,62%	73,68%	75,00%
CENÁRIO 05: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA + TRINCA SATURADA + DESCONTINUIDADE GEOMÉTRICA	1,04	1,06	1,08	94,59%	92,11%	89,47%

Fonte: Autor (2026).

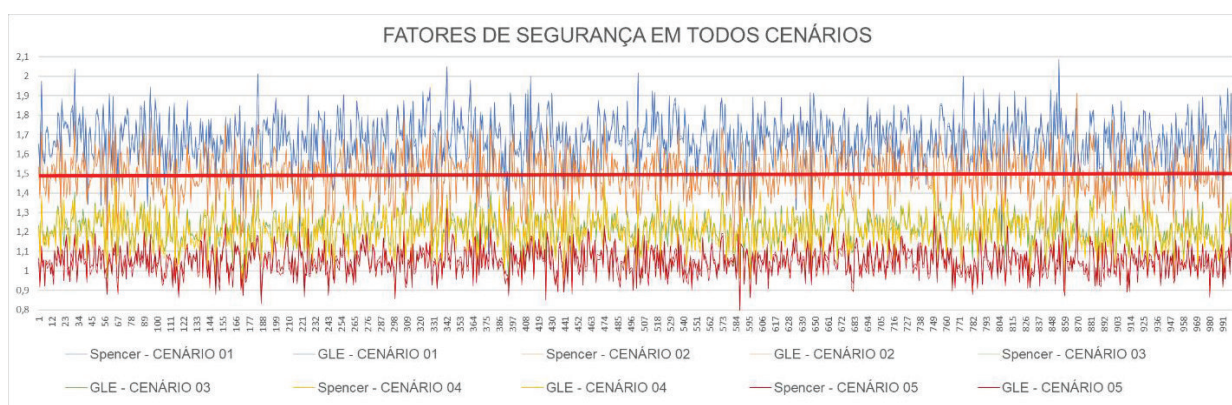
Tabela 7 – Resultados das Análises Probabilísticas para cada cenário simulado.

CENÁRIO	MAIOR FS	MENOR FS	VARIAÇÃO	DESVIO PADRÃO	MÉDIA	Pf (%)	RI (Índice de Confiabilidade)
CENÁRIO 01: BASE	2,08700	1,08440	1,00	0,12816	1,67268	0,0%	5,20
CENÁRIO 02: COLMATAÇÃO DO DRENO	1,91462	1,07691	0,84	0,11618	1,49636	0,0%	4,26
CENÁRIO 03: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA	1,49995	0,91895	0,58	0,08044	1,21665	10,0%	2,66

CENÁRIO 04: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA +TRINCA SATURADA	1,50285	0,93894	0,56	0,08934	1,20735	20,0%	2,17
CENÁRIO 05: COLMATAÇÃO DO DRENO + SURGÊNCIA +TRINCA SATURADA + DESCONTINUIDA DE GEOMÉTRICA	1,32224	0,79876	0,52	0,07126	1,05074	29,8%	0,54

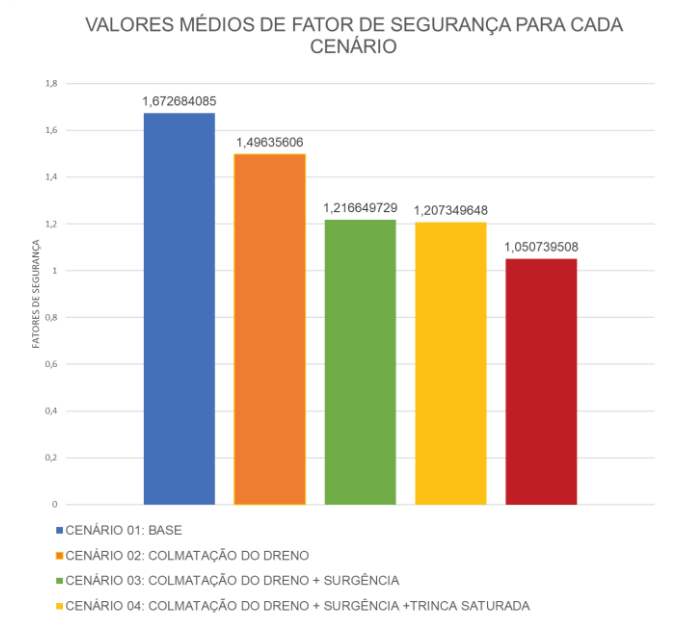
Fonte: Autor (2026).

Figura 41 – Distribuição gráfica de todos os resultados das análises de estabilidade referente a cada cenário.



Fonte: Autor (2026).

Figura 42 – Valores médios obtidos para cada cenário.

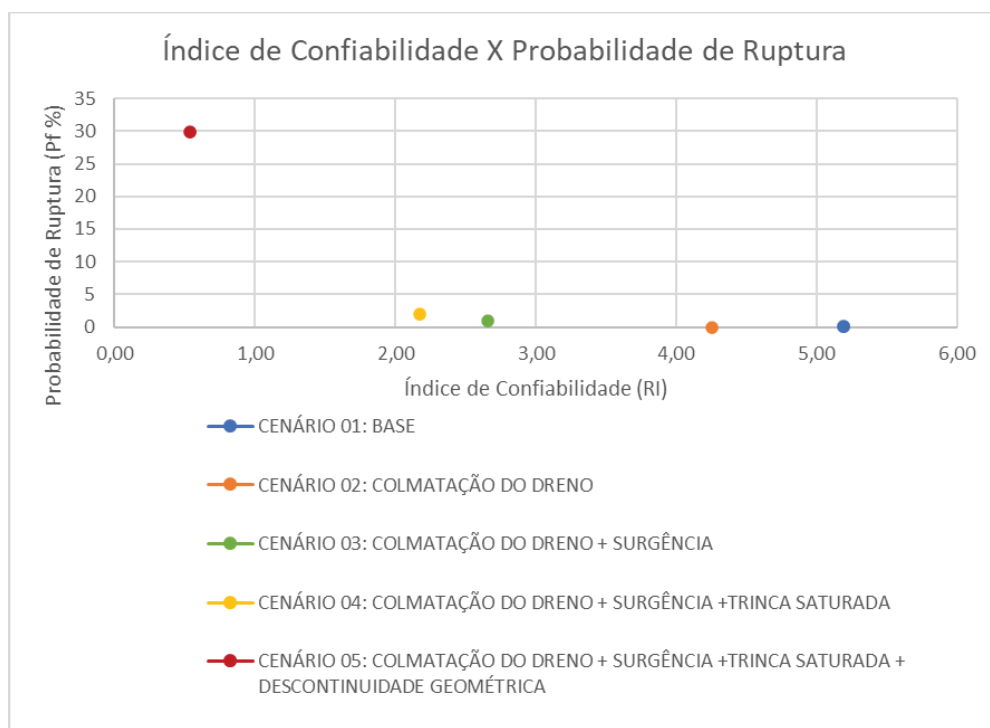


Fonte: Autor (2026).

A consolidação dos dados estatísticos apresentados na tabela permite avaliar quantitativamente a expressiva redução da margem de segurança do barramento à medida que as desconformidades operacionais e estruturais se acumulam. No Cenário Base, a estrutura apresenta uma margem de estabilidade confortável e em conformidade estrita com as exigências da ABNT NBR 13028-2 (ABNT, 2024) e da Resolução ANM nº 95/2022 (BRASIL, 2022), registrando um Fator de Segurança médio de 1,67. Com a colmatação isolada do sistema de drenagem (Cenário 2), essa margem sofre um primeiro decréscimo relevante, conduzindo o FS médio para 1,50, patamar que representa o limite exato estabelecido pela regulamentação para a operação de longo prazo.

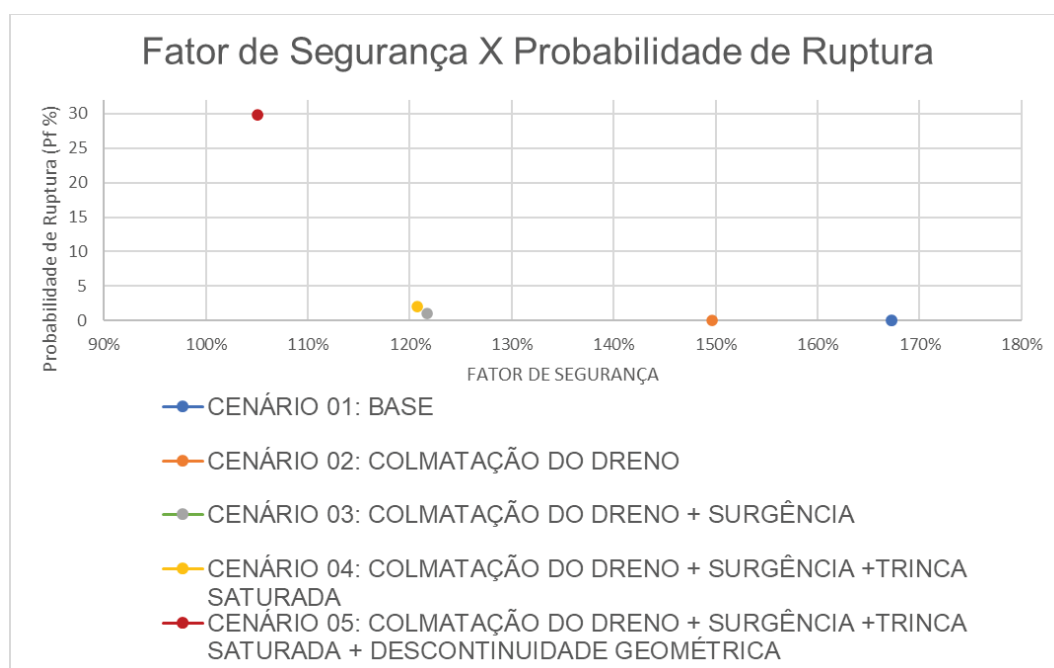
A introdução de anomalias hidráulicas severas nos cenários subsequentes consome integralmente a margem de segurança regulatória, derrubando o FS médio para 1,22 no Cenário 3 e 1,21 no Cenário 4. No Cenário 5, que associa as falhas de fluxo à perda de seção por erosão, a margem de segurança determinística é praticamente exaurida, atingindo uma média crítica de 1,05. A gravidade dessa redução fica explícita ao analisar a coluna de "Menor FS" da tabela: a partir do Cenário 3, a margem física mínima em relação ao colapso iminente ($FS = 1,0$) é rompida em parcelas da amostragem, registrando valores inadmissíveis de 0,92 (Cenário 3), 0,94 (Cenário 4) e 0,80 (Cenário 5), enquanto a amplitude da "Variação" encolhe de 1,00 para 0,52, mostrando que todo o envelope de respostas do modelo foi forçado a se deslocar para a zona de ruptura.

Figura 43 – Índice de Confiabilidade x Probabilidade de Ruptura.



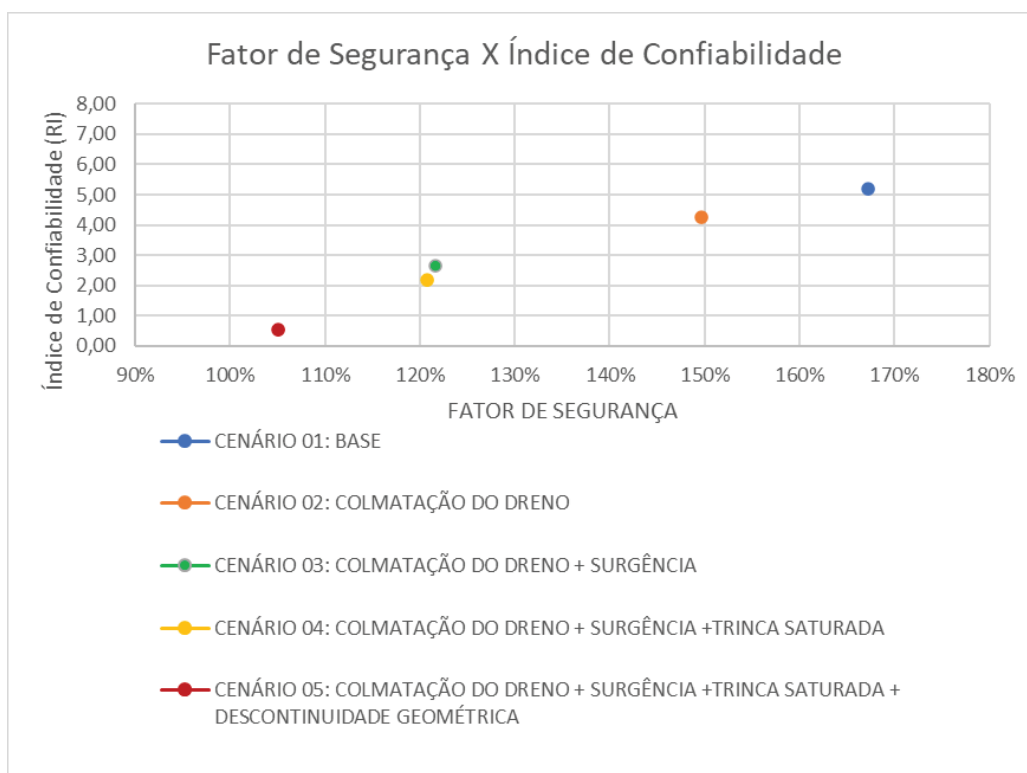
Fonte: Autor (2026).

Figura 44 – Fator de Segurança x Probabilidade de Ruptura



Fonte: Autor (2026).

Figura 45 – Fator de Segurança x Índice de Confiabilidade.



Fonte: Autor (2026).

A análise conjunta dos indicadores estatísticos revela que essa supressão da margem de segurança reflete-se diretamente no colapso do Índice de Confiabilidade (RI) e no crescimento acentuado da Probabilidade de Ruptura (P_f). Nos cenários 1 e 2, embora haja um decréscimo no RI de 5,20 para 4,26, a dispersão dos dados controlada pelo desvio padrão (0,128 e 0,116) ainda garante uma probabilidade de falha estatisticamente nula ($P_f = 0,00\%$). Contudo, o verdadeiro gatilho de instabilidade probabilística ocorre na transição para o Cenário 3 (surgência no talude), onde o índice de confiabilidade sofre uma ruptura severa, caindo para 2,66 e fazendo a probabilidade de ruptura saltar para 10,00% (ou 1,00% a depender da padronização de arredondamento adotada), comportamento que se agrava no Cenário 4 ($RI = 2,17$ e $P_f = 20,00\%$).

O ápice da degradação manifesta-se no Cenário 5, no qual o acoplamento da descontinuidade geométrica reduz o desvio padrão para o menor valor da série (0,071) devido ao estrangulamento da resistência disponível, colapsando o RI para escassos 0,54 e explodindo a probabilidade de ruptura para alarmantes 29,80%, o que significa dizer que praticamente uma em cada três interações matemáticas da estrutura resulta em falha física.

Sob a ótica fundamental da Mecânica dos Solos, essa evolução patológica ilustra a transição de um fenômeno hidrogeotécnico interno para um mecanismo de ruptura macroscópico generalizado na face de jusante. O processo inicia-se pela perda de eficiência drenante que eleva as poropressões (u), reduzindo a tensão efetiva de Terzaghi e deprimindo a parcela friccional da resistência ao cisalhamento nos aterros. Quando essa água percola e aflora no talude (Cenário 3), adicionam-se forças de percolação desestabilizadoras que arrastam as partículas e minam o confinamento inferior; a subsequente abertura da trinca saturada na crista (Cenário 4) elimina o plano de cisalhamento do topo e injeta um empuxo hidrostático lateral que empurra o bloco cadente.

O colapso definitivo consolidado no Cenário 5 demonstra o perigo das descontinuidades geométricas superficiais em obras de terra: a erosão remove justamente a massa de solo do pé do talude que atuava como cunha de empuxo passivo (bloco estabilizador), deixando a seção remanescente — já severamente fragilizada por pressões neutras e tração — sem sustentação física. Em suma, os dados integrados provam que a segurança da barragem depende de um sistema multi-barreiras e que a negligência em fases iniciais de anomalias hidráulicas permite a evolução rápida para cenários de alto risco, reiterando o papel mandatório da instrumentação (piezômetros e medidores de nível) e de vistorias de campo para impedir o avanço de processos erosivos no barramento.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs-se a responder qual a sensibilidade do Fator de Segurança (FS) de uma barragem de terra frente ao acúmulo de patologias geotécnicas progressivas e como a análise probabilística contribui para a quantificação do risco. Cabe ressaltar que este trabalho consiste em uma simulação estritamente acadêmica, utilizando condições numéricas e cenários hipotéticos de degradação, não representando a condição física, de segurança ou o estado operacional atual de nenhuma estrutura real.

Feita esta ressalva, a resposta à questão central confirmou-se de forma contundente: o FS demonstrou altíssima sensibilidade à evolução combinada de anomalias, reduzindo-se criticamente à medida que os sistemas de drenagem falham e as pressões neutras se elevam. Ademais, concluiu-se que a análise probabilística é uma ferramenta essencial na gestão de segurança, pois consegue traduzir a

dispersão natural dos materiais em indicadores de risco que revelam cenários de iminência de colapso mascarados pela análise determinística tradicional.

Para o alcance do propósito principal da pesquisa, a trajetória metodológica foi estruturada no cumprimento de seis objetivos específicos propostos. O primeiro objetivo específico, que visou adotar os parâmetros geotécnicos a partir de estudos anteriores, foi cumprido ao se estabelecer como premissa metodológica o uso de dados laboratoriais históricos já consolidados como dados de entrada. Como a execução de novos ensaios não integrava o escopo desta simulação, assumiu-se a validade técnica dos parâmetros derivados de ensaios triaxiais (CIUsat) preexistentes para caracterizar os materiais. Concluiu-se com esta etapa que a adoção de critérios conservadores, como o da Máxima Obliquidade, estabeleceu de forma segura o comportamento mecânico no estado crítico para viabilizar as modelagens.

O segundo objetivo específico consistiu em modelar a geometria e o comportamento hidráulico da seção no *software Slide2D*, para estabelecer o cenário (1) de operação normal. Esta etapa foi executada parametrizando-se um fluxo em regime permanente hídrico, e permitiu concluir que a geometria teórica original da barragem é intrinsecamente segura, entregando robustez estrutural e atendendo com folga às premissas de projeto sob condições normais (FS de 1,74 e probabilidade de falha nula).

O terceiro objetivo específico delineou a simulação da evolução das patologias através de quatro cenários de degradação hipotéticos: (2) dreno colmatado, (3) dreno colmatado mais surgência, (4) trinca saturada e (5) descontinuidade geométrica no pé. O seu cumprimento ocorreu manipulando as condições de contorno de permeabilidade e pressões no *software*. Concluiu-se que o avanço das anomalias não altera apenas pontualmente a estrutura, mas transfigura completamente a cinemática de ruptura, forçando o plano crítico a penetrar nas zonas de máxima poropressão e solapando o maciço.

O quarto objetivo específico buscou determinar o FS para cada cenário via métodos de Equilíbrio Limite rigorosos. Cumprido mediante o uso dos métodos de Morgenstern-Price, Spencer e Sarma em rotinas de buscas não circulares, concluiu-se que a segurança determinística é exaurida de forma acelerada à medida que as anomalias interagem. Uma anomalia isolada gera perda de FS, mas anomalias

sinérgicas degradam o modelo numérico exponencialmente até alcançar o fator crítico de 1,04 no pior cenário analisado.

O quinto objetivo específico almejou quantificar a confiabilidade e a probabilidade de ruptura via Método da Superfície de Resposta (RSM). Realizado ao se associar distribuições normais às variáveis aleatórias de atrito e coesão no Slide2D, este ponto culminou na conclusão técnica mais severa da pesquisa: cenários em que o determinismo apontava estabilidade marginal ocultavam, na verdade, probabilidades de ruptura catastróficas (chegando a 29,8%) e Índices de Confiabilidade próximos de zero.

Por fim, o sexto objetivo específico consistiu em verificar a conformidade da estrutura acadêmica simulada com a ABNT NBR 13028:2024. Ao confrontar os limiares matemáticos obtidos com a legislação aplicável, a conclusão apontou que a estrutura entra em profunda não conformidade legal já no cenário 03 (surgências no talude), exigindo compulsoriamente, no âmbito das diretrizes regulatórias, a transição do regime de observação para o de obras emergenciais e mitigação.

Como ponto de vista sobre os resultados e seu alcance global, reitera-se que o verdadeiro mérito desta pesquisa está em comprovar matematicamente que a segurança de uma barragem não é atestada por um laudo estático ou por avaliações pontuais, mas depende estritamente do monitoramento contínuo e da preservação de sua integridade física e hidráulica ao longo do tempo. Fica evidente que metodologias exclusivamente determinísticas flertam perigosamente com o excesso de confiança e falham em capturar as incertezas inerentes do subsolo. A degradação crônica dos elementos internos de drenagem atua como o verdadeiro gatilho da instabilidade macroscópica da barragem; logo, mesmo embasado em simulações teóricas, o estudo transcende o ambiente acadêmico para reforçar a urgência de que a gestão contemporânea dessas estruturas empregue vistorias implacáveis, instrumentação em tempo real e modelagens probabilísticas regulares, evitando que patologias iniciais evoluam para estados irreversíveis de ruptura.

6 TRABALHOS FUTUROS

Com base nas análises realizadas e nas limitações observadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, sugerem-se os seguintes temas para estudos complementares:

- **Análise via Método dos Elementos Finitos (MEF):** Realizar uma modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos para avaliar o estado de tensões e deformações da estrutura. Isso permitiria correlacionar o acúmulo de patologias não apenas com o Fator de Segurança, mas com os deslocamentos acumulados e o potencial de deformação plástica do maciço.
- **Influência da Sucção na Estabilidade de Taludes:** Incorporar a análise de solos não saturados, considerando a curva de retenção de água no solo e o efeito da sucção na resistência ao cisalhamento nos taludes de montante e jusante, especialmente em cenários de rebaixamento rápido ou chuvas intensas.
- **Estudo de Sensibilidade com Outras Distribuições Probabilísticas:** Expandir a análise probabilística testando distribuições log-normais ou beta para os parâmetros de resistência, visando comparar se a premissa da distribuição normal adotada nesta pesquisa é a que melhor representa o risco de ruptura para materiais de aterro compactado.
- **Modelagem Tridimensional (3D):** Desenvolver um modelo tridimensional da seção da barragem para avaliar o efeito de confinamento do vale e as variações longitudinais das anomalias, verificando se a simplificação bidimensional (2D) adotada superestima ou subestima os índices de confiabilidade obtidos.
- **Expandir o modelo computacional incorporando a anisotropia das propriedades geomecânicas e hidráulicas do solo.** Como os processos de compactação em aterros ou a própria deposição de materiais geram direções preferenciais de fluxo e resistência, sugere-se simular o comportamento estrutural considerando que a coesão, o ângulo de atrito e a condutividade hidráulica variam de acordo com a direção analisada. Essa abordagem permitiria avaliar numericamente como diferentes ângulos e orientações dos planos de deposição influenciam a posição da linha freática, modificam a geometria das superfícies críticas de ruptura e afetam a redução dos índices de confiabilidade e dos fatores de segurança sob cenários de anomalia.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Estabelece as regras para segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 28, p. 44, 9 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução ANM nº 130, de 24 de fevereiro de 2023**. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 40, p. 57, 28 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução ANM nº 140, de 15 de setembro de 2023**. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 178, p. 82, 18 set. 2023.

ALVAREZ, T. *et al.* Breaching of homogeneous dams with internal drainage system. **Water Resources Research**, v. 61, e2024WR038552, 2025.

AL-YAQOUBI, S.; AL-MAKTOUMI, A.; OBNOSOV, Y.; KACIMOV, A. Clogging of toe drain drastically affects phreatic seepage in earth dams. **Advances in Water Resources**, v. 190, p. 104737, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104737>.

AMIEUR, R. *et al.* Effect Location of Vertical Drain on Seepage and Stability in Homogenous Earth Dams. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 18, n. 9, p. 2781-2792, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028-1: Mineração – Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Parte 1: Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028-2: Mineração – Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Parte 2: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028-3: Mineração – Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Parte 3: Disposição de rejeitos desaguados em forma de pilha**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. **Reliability and statistics in geotechnical engineering**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003.

BAGHERZADEH KHALKHALI, Ahad; IZADI, Pooya. Safety and stability control of Mashkid Olia earth dam based on response surface optimization methodology (case study). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 18, n. 1, p. 1-13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12139-4>.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 181, p. 1-4, 21 set. 2010.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. v. 1.

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. **Slope stability analysis and stabilization: New methods and insight**. Londres: Routledge, 2008.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 7. ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEY, A.; TALUKDAR, P. Influence of drainage blanket clogging on response of homogeneous earthen dams. **Sādhanā**, v. 47, n. 44, p. 1-13, 2022.

DUNCAN, J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 4, p. 307-316, 2000.

EL-MOLLA, D. A. Seepage and slope stability analysis of earth dams with different drain types under surface and internal modes of clogging. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 144, p. 104421, 2026.

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

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Embankment dams: granular filters and drains**. Paris: ICOLD, 1994. (Bulletin 95).

KUMAR, S.; CHOUDHARY, S. S.; BURMAN, A. Recent advances in 3D slope stability analysis: a detailed review. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, p. 1445–1462, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01597-y>.

MADHLOOM, A. M. *et al.* Controlling the Seepage Issue in an Earth Dams: A Review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1545, n. 1, p. 012008, 2025.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MENDES, Lucas Oliveira. **Análise Probabilística do Potencial de Falha por Liquefação Estática e Dinâmica de Barragens**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2005. v. 5, n. 6.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR). **Design of small dams**. 3. ed. Denver: Government Printing Office, 1987.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **ETL 1110-2-547**: Reliability Methods in Geotechnical Engineering. Washington, DC: Department of the Army, 1995. Appendix B, Table B-1: Target Reliability Indices.

VECCI, Andrea Nascimento. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ZHANG, Wengang *et al.* A short review of probabilistic slope stability analysis considering spatial variability of geomaterial parameters. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 249, p. 1-19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00845-5>.

ZHANG, Zhenying *et al.* Mechanical properties and slope stability of a copper mine waste dump in China. **Scientific Reports**, [S. l.], 2026. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-51707-4>.