CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

LUCAS ANDRADE E SOUZA

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS

ARAXÁ - MG
15 de agosto de 2023

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS
MESTRADO PROFISSIONAL

LUCAS ANDRADE E SOUZA

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

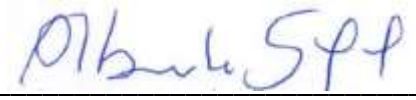
Orientador: Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto
Coorientador: Prof. Dr. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

ARAXÁ - MG
15 de agosto de 2023

ATA DA 21ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 15 (quinze) dias do mês de agosto do ano de 2023 (dois mil e vinte e três), às 10h30min (dez horas e trinta minutos), através da Plataforma Microsof TEAMS,foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando **LUCAS ANDRADE E SOUZA**, *sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pelo Prof. Dr. THIAGO BOMJARDIM PORTO (Presidente) – CEFET- MG, Prof. Dr. ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO (Coorientador) – PUC-Rio, Profa. Dra. LAYS CRISTINA BARCELOS DE SOUZA D'HYPPOLITO (Membro externo) – PUC-Rio, Profa. Me. ANDREA NASCIMENTO VECCI (Membro externo) – PUC-Rio, Prof. Dr. ARMANDO BELATO PEREIRA (Membro externo) – CEFET-MG e Prof. Me. GUILHERME PEREIRA PINTO (Membro externo) – TERRACOTA GEOTECNIA. Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao (a) Mestrando(a) ***LUCAS ANDRADE E SOUZA***, até 40 (quarenta) minutos para a apresentaçãodo seu trabalho intitulado "AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa de *Geologia de Engenharia na Mineração*. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando está aprovado desde que atenda integralmente as recomendações da banca examinadora. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá-MG, 15 de agosto de 2023.



Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto
Presidente (CEFET-MG)

Prof. Dr. Alberto de Sampaio F. J. Sayão
Coorientador (Puc-Rio)

Prof. Dr. Armando Belato Pereira
Membro externo (CEFET-MG)

Prof. Dra. Lays Cristina B. S. D'hyppolito
Membro externo (Puc-Rio)

Prof. Me. Guilherme Pereira Pinto
Membro externo (Terracota Geotecnia)

Profa. Me. Andrea Nascimento Vecci
Membro externo (Puc-Rio)

Engenheiro Lucas Andrade Souza
Discente

Emitido em 16/08/2023

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 01/2023 - DECMCV (11.59.04)
(Nº do Documento: 6)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 16/08/2023 16:20)
ARMANDO BELATO PEREIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCECVG (11.64.04)
Matrícula: ###592#8

(Assinado digitalmente em 16/08/2023 15:26)
THIAGO BOMJARDIM PORTO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DECMCV (11.59.04)
Matrícula: ###247#0

(Assinado digitalmente em 16/08/2023 16:50)
LUCAS ANDRADE E SOUZA
DISCENTE
Matrícula: 2021######3

(Assinado digitalmente em 16/08/2023 20:15)
LAYS CRISTINA BARCELOS DE SOUZA DHYPPOLITO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.277-##

(Assinado digitalmente em 16/08/2023 15:45)
GUILHERME PINTO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.217-##

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: **6**, ano: **2023**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **16/08/2023** e o código de verificação: **d2e6d3279a**

Souza, Lucas Andrade e
S729a Avaliação geotécnica da estabilidade de uma barragem de rejeitos por métodos probabilísticos e determinísticos / Lucas Andrade e Souza. – 2023.
154 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto.
Coorientador: Prof. Dr. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2023.
Bibliografia.

1. Barragens – Medidas de Segurança – Teses. 2. Geotecnia – Teses. 3. Taludes (Mecânica dos solos) – Estabilidade – Teses. I. Porto, Thiago Bomjardim. II. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 624.136

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS POR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS E DETERMINÍSTICOS

LUCAS ANDRADE E SOUZA
Discente - PPGEMIN

THIAGO BOMJARDIM PORTO
Orientador - PPGEMIN

ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO
Coorientador – PUC Rio

Dissertação apresentada e aprovada em sessão pública em 15 de agosto de 2023, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Dr. THIAGO BOMJARDIM PORTO
(CEFET/MG)

Dr. ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO
(PUC Rio)

Dr. ARMANDO BELATO PEREIRA
(CEFET/MG)

Dra. LAYS CRISTINA BARCELOS DE SOUZA D'HYPPOLITO
(PUC Rio)

Me. ANDREA NASCIMENTO VECCI
(PUC Rio)

Me. GUILHERME PEREIRA PINTO
(CONSULTOR)

ARAXÁ - MG
15 de agosto de 2023

Esta dissertação é dedicada à minha família:

Minha mãe, Tayza, fonte de inspiração e amor.
Meu pai, Jacy, pela criação e cuidado.
Minha irmã, Sofia, símbolo de resiliência e comprometimento.
Meu irmão, Artur, nossa luz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, pela oportunidade e por proporcionar, com excelência, o desenvolvimento do conhecimento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto, pela disponibilidade e paciência ao longo de todo processo.

Ao Prof. Dr. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão, por ter aceitado o convite para ser meu coorientador. Serei eternamente grato por todo conhecimento compartilhado, o senhor é um exemplo de pessoa e profissional a ser seguido. Foi uma honra.

Aos componentes da banca, em especial à Profa. Andrea Nascimento Vecci e ao Prof. Guilherme Pereira Pinto, por todo suporte técnico para elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos de Ibiá (Opa4ever), pela amizade, acolhimento e preocupação, apesar da distância, o carinho é sempre o mesmo.

À Karina Lima Tôsto, Christiane Müller e à Taíza Soares de Assis, por todo suporte psicológico durante todo o período do mestrado.

Ao Supermercado Líder, por disponibilizar sua estrutura física, durante um apagão nacional, para que a defesa da dissertação pudesse ser realizada.

Ao meu companheiro, Daniel Rezende, por ser e existir, sem seu apoio, motivação, paciência e cumplicidade com certeza a trajetória teria sido bem mais complicada.

Aos meus pais, irmã e irmão, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos da minha vida.

“A incerteza é sempre a precursora da mudança.”

Dan Brown

RESUMO

A análise de estabilidade tem como objetivo verificar a possibilidade de ocorrência de ruptura do maciço em um talude artificial ou natural. A análise é realizada por meio da comparação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura, a partir de vários cenários de projeto. A abordagem determinística utiliza uma estimativa para cada parâmetro de entrada, porém, constata-se que, na natureza, as propriedades dos materiais tendem a ser heterogêneas. Frente a esta heterogeneidade, oscilações podem ocorrer nos valores adotados para os parâmetros geotécnicos. A incorporação de métodos probabilísticos se torna uma importante ferramenta para lidar com os riscos inerentes às obras geotécnicas, posto que incorporam a variabilidade dos parâmetros dos projetos, baseando-se nas distribuições estatísticas que consideram a frequência de ocorrências de dados e possibilitam calcular a Probabilidade de Ruptura (PR) e o Índice de Confiabilidade (β) das estruturas. Esta pesquisa pretende reavaliar a segurança da Barragem I que estava localizada na Mina Córrego do Feijão, região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais, com o uso de análises determinísticas e probabilísticas. As análises de estabilidade foram realizadas por dois métodos determinísticos (Morgenstern-Price e Spencer) e probabilísticos (FOSM e Monte Carlo). Os resultados indicam que a posição da linha freática influencia significativamente nos valores de PR e β, a medida em que o nível d'água se afasta verticalmente da crista da estrutura, a PR varia de 50% a 1,77%, para o β, a variação é de 0,000 a 2,226. O método FOSM apresentou respostas mais conservadoras quando comparado ao de Monte Carlo, independentemente da posição do nível d'água no interior da barragem. Houve uma ligeira variação de resultados entre os dois métodos de Equíbrio Limite empregados, os valores de β foram superiores para o método de Spencer em 6 dos 8 cenários avaliados, já a PR foi mais conservadora para o método de Morgenstern-Price. Nessa pesquisa, as respostas das análises determinísticas e probabilísticas aplicadas em diferentes posições de nível d'água confirmam a situação precária de estabilidade da barragem, a qual sofreu ruptura em 2019.

Palavras-chave: Geotecnia; Barragem de rejeitos; Estabilidade; Equilíbrio Limite; Análise Probabilística; Análise Determinística.

ABSTRACT

The stability analysis aims to verify the possibility of failure of the massif on an artificial or natural slope. The analysis is performed by comparing the mobilized shear stresses and the shear strength along a potential failure surface, based on various design scenarios. The deterministic approach uses an estimate for each input parameter, however, it appears that, in nature, material properties tend to be heterogeneous. Given this heterogeneity, fluctuations may occur in the values adopted for geotechnical parameters. The incorporation of probabilistic methods becomes an important tool to deal with the risks inherent to geotechnical works, as they incorporate the variability of project parameters, based on statistical distributions that consider the frequency of data occurrences and make it possible to calculate the Probability of Rupture (PR) and the Reliability Index (β) of the structures. This research aims to reassess the safety of Dam I, which was located in the Córrego do Feijão Mine, in the Iron Quadrangle region of Minas Gerais, using deterministic and probabilistic analyses. Stability analyzes were performed using two deterministic (Morgenstern-Price and Spencer) and probabilistic (FOSM and Monte Carlo) methods. The results indicate that the position of the water table significantly influences the values of PR and β, as the water level moves vertically away from the crest of the structure, the PR varies from 50% to 1.77%, for β, the range is from 0.000 to 2.226. The FOSM method presented more conservative responses when compared to the Monte Carlo method, regardless of the position of the water level inside the dam. There was a slight variation in results between the two Limit Equilibrium methods used, the β values were higher for the Spencer method in 6 of the 8 scenarios evaluated, while the PR was more conservative for the Morgenstern-Price method. In this research, the responses from deterministic and probabilistic analyzes applied at different water level positions confirm the precarious stability situation of the dam, which suffered a rupture in 2019.

Key words: Geotechnics; Tailings dam; Stability; Limit Equilibrium; Probabilistic Analysis; Deterministic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método construtivo de jusante 26
Figura 2 - Método construtivo de montante. 27
Figura 3 - Método construtivo linha de centro. 29
Figura 4 - Movimento de escorregamento de talude 38
Figura 5 - Resistência cisalhante mobilizada e resistência ao cisalhamento em taludes. 38
Figura 6 - Processo de divisão da massa rompida em fatias. 40
Figura 7 - Incertezas na estimação de propriedades do solo. 41
Figura 8 - Probabilidade de Ruptura versus Índice de Confiabilidade. 44
Figura 9 - Distribuição de probabilidade do Fator de Segurança para FS diferentes. 44
Figura 10 - Níveis de aceitação de Índices de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura. 45
Figura 11 - Mapa com localização da Barragem I. 55
Figura 12 - Seção que ilustra o sequenciamento construtivos da Barragem I. 57
Figura 13 - Vista aérea da Barragem I. 58
Figura 14 - Seções instrumentadas da Barragem I. 60
Figura 15 - Seção-Tipo (4-4) e materiais existentes. 62
Figura 16 - Linha freática obtida para seção 4-4. 63
Figura 17 - Seção 3-3 obtida pelo Painel de Especialistas. 64
Figura 18 - Calibração para obtenção do nível d'água pelo Painel de Especialistas. 64
Figura 19 - Imagem aérea da Barragem I de agosto/2016, com destaque à berma do recuo ou retificação do eixo, entre os denominados alteamentos 3º e 4º. 68
Figura 20 - Freática S-01. 72
Figura 21 - Freática REF. 72
Figura 22 - Freática I-01. 73
Figura 23 - Freáticas S-01, REF e I-01. 73
Figura 24 - Resultado do FS para S-01 - Superfície de ruptura circular. 81
Figura 25 - Resultado do FS para REF - Superfície de ruptura circular. 81
Figura 26 - Resultado do FS para I-01 - Superfície de ruptura circular. 82
Figura 27 - Resultado do FS para I-02[1] - Superfície de ruptura circular. 82
Figura 28 - Resultado do FS para S-01 - Superfície de ruptura não circular. 83
Figura 29 - Resultado do FS para REF - Superfície de ruptura não circular. 83
Figura 30 - Resultado do FS para I-01 - Superfície de ruptura não circular. 84
Figura 31 - Resultado do FS para I-02[2] - Superfície de ruptura não circular. 84

Figura 32 - Freática I-02¹.....88
Figura 33 - Freática I-02².....88
Figura 34 - Representação de todas as freáticas analisadas.....89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de incidentes em relação ao método construtivo de barragem. 28
Gráfico 2 - Número de barragens por método construtivo no Brasil em 2022. 30
Gráfico 3 - Causas de rupturas em barragens de rejeito. 30
Gráfico 4 - Acidentes com barragens de rejeito. 32
Gráfico 5 - Alterações nos piezômetros e indicadores de nível d'água acima do recuo. 69
Gráfico 6 - Alterações nos piezômetros e indicadores de nível d'água no recuo e abaixo dele. 69
Gráfico 7 - Compilação de precipitação de quatro estações pluviométricas próximas a Barragem I. 70
Gráfico 8 - Comportamento da PR x Superfície de Ruptura | SPENCER. 94
Gráfico 9 - Comportamento da PR x Superfície de Ruptura | MORGENSTERN-PRICE. 94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Coeficientes de variação usuais por parâmetro geotécnico. 37
Quadro 2 - Índices de confiança para distribuição normal. 46
Quadro 3 - Síntese de pesquisas anteriores. 50
Quadro 4 - Sequência construtiva da Barragem I. 56
Quadro 5 - Classificação da Barragem I da Mina Córrego do Feijão. 58
Quadro 6 - Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade. 66
Quadro 7 - Estatística básica para os parâmetros geotécnicos. 67
Quadro 8 - Posição das freáticas antes da sensibilidade para I-02. 71
Quadro 9 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 1. 76
Quadro 10 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 2. 77
Quadro 11 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 3. 78
Quadro 12 - Fatores de Segurança determinístico para as freáticas S-01, REF e I-01. 80
Quadro 13 - Fator de Segurança determinístico para freática I-02. 86
Quadro 14 - Posição das freáticas após a sensibilidade para I-02. 87
Quadro 15 - Comparação entre FS com outros trabalhos (Spencer e ruptura circular) 90
Quadro 16 - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática S-01 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular. 91
Quadro 17 - Valores de PR e β para superfície de ruptura circular. 92
Quadro 18 - Valores de PR e β para superfície de ruptura não circular. 92
Quadro 19 - Aumento (em %) - Morgenstern-Price. 95
Quadro 20 - Aumento (em %) - Spencer. 95
Quadro 21 - Comparação com Braga (2019). 95
Quadro 22 - Influência das variáveis pelo método FOSM – Superfície não circular. 97
Quadro 23 - Influência das variáveis pelo método FOSM – Superfície circular. 98
Quadro 24 - Dados estatísticos utilizados para aplicar o método de Monte Carlo. 100
Quadro 25 - Valores de PR (em % e fração) e β para superfície de ruptura circular. 101
Quadro 26 - Valores de PR (em % e fração) e β para superfície de ruptura não circular. 101
Quadro 27 - Resumo dos resultados de Probabilidade de Ruptura (FOSM e MC). 102

Quadro 28 - Resumo dos resultados de Índice de Confiabilidade (FOSM e MC). 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das características dos Métodos de Equilíbrio Limite. 40
Tabela 2 - Níveis de aceitação de PR e β. 45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

COV – Coeficiente de Variação

CRI – Categoria de Risco

CT – Características Técnicas

DPA – Dano Potencial Associado

EC – Estado de Conservação

EP – Estimativas Pontuais

FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente

FOSM – First Order Second Moment

FS – Fator de Segurança

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICOLD – International Commission on Large Dams

INA – Indicador de Nível D'água

MC – Monte Carlo

MJSP – Ministério da Justiça e Segurança Pública

MPMG – Ministério Público de Minas Gerais

NSPT – Índice de Resistência à Penetração do Solo

PAEBM – Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PR – Probabilidade de Ruptura

PIB – Produto Interno Bruto

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PZ – Piezômetro

RPSB – Revisão Periódica de Segurança de Barragem

SEMAD – Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais

SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

SUPPRI – Superintendência de Projetos Prioritários do Governo de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

β – Índice de Confiabilidade

μ – Média

xi – Variável Aleatória Individual

n – Número de Amostras que Compõe uma População

σ – Desvio Padrão

γ – Peso Específico

c' – Coesão

Su/σ'v – Parâmetro de Resistência ao Cisalhamento Não-Drenada

ϕ – Ângulo de Atrito

Cc – Índice de Compressão

k – Coeficiente de Permeabilidade

Cv – Coeficiente de Adensamento

qc – Resistência de Ponta

Sv – Resistência Não-Drenada (ensaio de palheta)

E[FS] – Valor do FS Determinístico

σ[FS] – Desvio Padrão do FS

V[FS] – Real Variância do FS

V[Xi] – Variância Média das Variáveis

δXi – Variação da Média das Variáveis

δFSi – Variação do FS (Diferença entre FS Determinístico e o FS Obtido após a Variação)

N – Número Mínimo de Simulações para um Determinado Nível de Confiança Desejável

ε – Máximo Erro Permitido (em função do nível de confiança)

$h_{\alpha/2}$ – Índice em Função do Nível de Confiança Desejável

GLE – Método do Equilíbrio-limite Geral (Generalized Limit Equilibrium)

DIST.NORM – Cálculo da Probabilidade de Ruptura de Distribuição Normal pelo Excel

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO 19
1.1 - Tema 21
1.2 - Problema 21
1.3 - Hipótese 21
1.4 - Objetivos 22
1.4.1 - Objetivo Geral 22
1.4.2 - Objetivos Específicos 22
1.5 - Justificativa 22
2 - REVISÃO DE LITERATURA 24
2.1 - Produção Mineral no Brasil 24
2.2 - Barragem de Rejeitos de Mineração 25
2.2.1 - Método de Jusante 26
2.2.2 - Método de Montante 27
2.2.3 - Método Linha de Centro 29
2.3 - Segurança de Barragem 30
2.4 - Conceitos Fundamentais Sobre Estatística e Confiabilidade 34
2.4.1 - Média 34
2.4.2 - Desvio Padrão 35
2.4.3 - Coeficiente de Variação 35
2.5 - Análise de Estabilidade 37
2.5.1 - Análise de Estabilidade Determinística 39
2.5.2 - Análise de Estabilidade Probabilística 41
2.5.2.1 - Monte Carlo 45
2.5.2.2 - First Order Second Moment (FOSM) 47
2.6 - Pesquisas Anteriores 50
3 - MATERIAIS E MÉTODOS 54
3.1 - Estudo de Caso 54
3.1.1 - Histórico da Estrutura 54
3.1.2 - Características Geológico-Geotécnicas 59
3.1.3 - Seção-Tipo da Barragem 60
3.1.4 - Parâmetros Geotécnicos 64
3.1.5 - Análise de Sensibilidade da Linha Freática 67

3.2 - Análise de Estabilidade Determinística 74
3.3 - Análise de Estabilidade Probabilística 74
3.3.1 - FOSM 74
3.3.2 - Monte Carlo 79
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO 80
4.1 - Análise de Estabilidade Determinística 80
4.2 - Análise de Estabilidade Probabilística 90
4.2.1 - FOSM 90
4.2.1.1 - Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade 90
4.2.1.2 - Verificação da Influência dos Parâmetros Geotécnicos 95
4.2.2 - Monte Carlo 100
4.2.3 - Comparação entre os Métodos Probabilísticos 102
5 - CONCLUSÃO 104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 107
APÊNDICE I - FOSM 124
APÊNDICE II – MONTE CARLO 146

1 - INTRODUÇÃO

Devido ao aumento populacional e o desenvolvimento tecnológico, observa-se um crescimento contínuo na utilização de recursos minerais, demandando, dessa forma, uma maior extração de minérios. O setor minerário tem uma grande importância na economia, tendo em vista que provê matérias-primas para diversas indústrias, e representa uma significativa fração no Produto Interno Bruto (PIB) de alguns países ao redor do globo. O Brasil é um país com forte tendência a atividades minerárias, as quais representam cerca de 4% do valor total do PIB nacional, de acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2021).

Segundo o IBRAM (2022), a indústria mineral foi indispensável para que se pudesse manter o saldo positivo da balança comercial brasileira no ano de 2021. O setor registrou alta de faturamento de 62% em relação a 2020, totalizando R$ 339,1 bilhões (desconsiderando petróleo e gás). Localizado no sudeste do Brasil, o estado de Minas Gerais dispõe do maior número de mineradoras do país, tendo alavancado sua participação no faturamento total do setor mineral, variando de 45,2% no 1º semestre de 2022 para 50,5% no 1º semestre de 2023 (IBRAM, 2023). Na região centro sul de Minas Gerais, mais especificamente conhecida como Quadrilátero Ferrífero, concentra-se grandes empreendimentos minerários, especialmente de ouro e ferro (IBRAM, 2021).

Como consequência da alta demanda por minério, verifica-se um aumento no volume de rejeitos provenientes das atividades do seu beneficiamento (RESO, 2015). Em suma, os rejeitos são consolidados por uma mistura de quantidade significativa de água e contaminantes e, seu descarte seguro e sustentável é essencial para prevenir contaminações da água e do meio ambiente como um todo (XU; WANG, 2015).

Existem diferentes maneiras para disposição destes materiais, sendo a barragem de terra o método mais comumente empregado pelas mineradoras (ESPÓSITO, 2000). O represamento de rejeitos existe há cerca de um século e, embora a construção e manutenção de barragens de rejeitos constituam um fenômeno recente nas indústrias de mineração, a legislação atual veio a limitar as alternativas disponíveis para este tipo de estrutura geotécnica. O comportamento e característica da barragem estão vinculados ao seu método construtivo, no qual podem ser aplicados materiais compactados oriundos de áreas de empréstimo ou derivados do próprio rejeito resultante da atividade minerária (SANTOS, 2007).

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2020), Minas Gerais conta com 654 barragens, sendo 61,77% pertencentes à mineração. Em decorrência dos acidentes recentes envolvendo a Barragem do Fundão, em 2015, e a Barragem I (BI) do Córrego do Feijão, em 2019, ambas no Estado de Minas, os órgãos reguladores e ambientais vêm intensificando a fiscalização a partir da criação de novas leis e critérios que devem ser seguidos pelas mineradoras, sobre pena de sanções. Conforme Oliveira (2010), os acidentes envolvendo barragens de rejeitos causam grandes preocupações nas empresas mineradoras e na sociedade, e têm impulsionado a realização de reavaliações no que tange as práticas de engenharia, assim como condutas de segurança e de cunho ambiental, com o objetivo de prevenir e/ou minimizar os impactos causados pela operação das barragens.

De acordo com a *International Commission on Large Dams* - ICOLD (2001), entre as principais causas de ruptura de barragens destacam-se: patologias relacionadas a fundação; capacidade inadequada dos extravasores; instabilidade dos taludes; falta de controle da erosão; deficiência na inspeção e no monitoramento pós-fechamento e, por fim, falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura. Considerando o histórico de rupturas de barragens entre os anos de 1910 e 2010, cerca de 1,2% das barragens de mineração apresentaram rupturas, contra apenas 0,01% das barragens civis (AZAM; LI, 2010). Tal informação fornece uma dimensão da complexidade das barragens de rejeitos em comparação as demais barragens para uso civil, as quais podem ser exemplificadas como barragens utilizadas para geração de energia e para o armazenamento de água para atividades agrícolas, consumo direto e recreação.

Em todo o globo somam-se diversos rompimentos de barragens de rejeitos que ocorreram recentemente, os quais resultaram em impactos severos, principalmente no que tange o volume de rejeito escoado para o meio ambiente e o número de mortes humanas. Destacam-se os eventos ocorridos em Ajka (Hungria) em 2010, Padcal (Filipinas) em 2012, Mount Polley (Canadá) em 2014, Fundão (também conhecido como Samarco; Brasil) em 2015, Luoyang Xiangjiang Wanji (China) em 2016, Vedanta (Índia) em 2017, Barragem I da Mina Córrego do Feijão (também conhecido como Brumadinho, Brasil) em 2019 e Tieli (China) em 2020 (LUMBROSO *et al.*, 2021).

Quando se busca avaliar as causas do rompimento de barragens de rejeitos, comumente, um, dentre outros fatores envolvidos, corresponde a instabilidade do talude. O tradicional procedimento para a análise da estabilidade de taludes é o método determinístico de Equilíbrio

Limite, em que todos os parâmetros do modelo têm valores médios. Devido à complexidade inerente a uma barragem de rejeitos, deve-se levar em consideração que o comportamento dos materiais utilizados apresenta um elevado grau de incerteza (SAUSEN NETTO, 2019).

Além disso, as propriedades do solo do aterro variam espacialmente devido à compactação e ao procedimento de construção em camadas, e, portanto, os parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, peso específico, etc.) podem ter certa imprecisão embutida. Por esta razão, é altamente desejável o emprego de métodos de análise probabilística para projetos de barragens de aterro que considerem as incertezas mencionadas anteriormente e a variabilidade espacial do solo (MJSP, 2019).

1.1 - Tema

- Amplo: Barragens de mineração;
- Delimitado: Análise de estabilidade determinística e probabilística em barragem de rejeitos.

1.2 - Problema

Nas últimas décadas, diversos rompimentos de barragens de rejeitos ocorreram ao redor do mundo, os quais resultaram em impactos ambientais significativos e mortes. A instabilidade de taludes é apontada como um dos modos de rupturas de barragens. Atualmente, a maioria das análises de estabilidade de taludes é feita com viés determinístico, desconsiderando o caráter variável dos parâmetros geotécnicos que caracterizam os materiais envolvidos nas análises.

1.3 - Hipótese

A variação da posição da linha freática tem influência significativa na estabilidade de uma estrutura geotécnica, logo, espera-se que à medida que o nível d'água no interior de uma barragem se eleva, maior será sua Probabilidade de Ruptura.

1.4 - Objetivos

1.4.1 - Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar, analisar e comparar a influência da variação da linha freática e dos parâmetros geotécnicos na segurança de uma estrutura geotécnica através de métodos determinísticos e probabilísticos, fundamentando-se em um caso real de uma barragem de rejeitos alteada pelo método de montante.

1.4.2 - Objetivos Específicos

- ✓ Comparar os resultados dos métodos probabilísticos empregados nas análises de estabilidade;
- ✓ Avaliar quais parâmetros geotécnicos possuem maior influência relativa nas análises de estabilidade;
- ✓ Comparar as superfícies de ruptura não circular e circular;
- ✓ Avaliar se as análises de estabilidade pelos métodos determinísticos convergem para uma condição de ruptura;
- ✓ Avaliar se as análises de estabilidade pelos métodos probabilísticos convergem para uma condição de ruptura;
- ✓ Indicar a condição crítica entre as freáticas analisadas (posição da freática e superfície de ruptura).

1.5 - Justificativa

A análise de estabilidade tem como objetivo aferir a possibilidade de ocorrência de ruptura do maciço em um talude artificial ou natural, a partir do cálculo de um valor de Fator de Segurança ou a Probabilidade de Ruptura. A análise é realizada por meio da comparação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura. Na abordagem determinística utilizam-se estimativas médias

para cada parâmetro de entrada, apesar de ser notório que, na natureza, as propriedades dos materiais são variáveis.

Frente a essa variabilidade, oscilações podem ocorrer nos valores adotados para os parâmetros geotécnicos adotados nas análises. Diante deste pressuposto, a incorporação de métodos probabilísticos podem ser ferramentas úteis para lidar com os riscos presentes em obras geotécnicas, já que incorporam a variabilidade dos parâmetros, tendo como base as distribuições estatísticas, nas quais se considera a frequência de ocorrências de dados para calcular a Probabilidade de Ruptura e a confiabilidade das estruturas.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Produção Mineral no Brasil

A mineração representa um setor vital para o bem-estar social e para um desempenho eficiente da economia mundial (GOMEZ *et al.*, 2014; MANCINI; SALA, 2018). As atividades de mineração ao redor do mundo proporcionam a extração de matéria-prima necessária para suprir as necessidades cotidianas da sociedade, abastecendo as respectivas indústrias que dependem deste meio para garantir a produção adequada de um determinado bem ou serviço (LUMBROSO *et al.*, 2021). O Brasil é reconhecido por sua diversificada e extensa exploração mineral, com grandes minas localizadas nos estados do Pará, Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais e importantes minas também nos estados do Amapá, Maranhão e Bahia (FERNANDES *et al.*, 2022).

De acordo com o IBRAM (2023), o setor de mineração do Brasil obteve um salto considerável em sua movimentação financeira, com um faturamento de R$ 120 bilhões entre janeiro e junho de 2023. Nesse período, observou-se um crescimento de 6% quando comparado aos primeiros seis meses de 2022. Atualmente, o Brasil ocupa uma posição acentuada na produção de matéria-prima de origem mineral com o ouro, cobre, nióbio, manganês, alumínio e minério de ferro, sendo, ainda, o maior exportador de matéria bruta de minério de ferro no mundo, concentrando suas maiores reservas nos estados do Pará e Minas Gerais (IBRAM, 2021).

Diante dos dados supracitados, torna-se evidente que o setor de mineração tem grande importância na economia, ao mesmo passo que também resulta em um impacto ambiental significativo. Para obter-se um mineral mais concentrado e competitivo no mercado internacional, é preciso que ele passe primeiro pelo processo de beneficiamento. Este processo consiste em separar o material valioso do rejeito, o qual não apresenta interesse econômico e que normalmente é disposto em barragens (VALE, 2016 *apud* COSTA, 2021).

A produção de rejeitos está em constante crescimento entre as mineradoras, e, se dispostos de maneira inadequada, estes materiais podem causar prejuízos ao meio ambiente, o que gera uma preocupação cada vez maior nas empresas voltadas ao setor minerário. Sendo assim, cresce o número de empresas que tentam controlar e minimizar os impactos ambientais e os custos

associados à contenção dos rejeitos, buscando novas formas de armazenamento/disposição visando, simultaneamente, uma maior economia monetária e uma efetiva segurança. Diante deste cenário, a alternativa mais utilizada na contemporaneidade, sendo esta oriunda desde décadas passadas, é a disposição em sistemas de barragens (REZENDE, 2013).

2.2 - Barragem de Rejeitos de Mineração

O método mais comum de disposição dos rejeitos da mineração é o seu lançamento em polpa, em reservatórios de barragens dedicadas a este fim. De acordo a Resolução nº 95 publicada em 07 de fevereiro de 2022 pela Agência Nacional de Mineração (ANM) (BRASIL, 2022), as barragens de mineração, são definidas como:

> Barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais (BRASIL, 2022, p. 2).

As barragens podem ter mais de 100 metros de altura e, em alguns casos, vários quilômetros de extensão (KOSSOFF *et al.*, 2014), sendo regularmente construídas com materiais prontamente disponíveis e frequentemente alteadas à medida que a quantidade de rejeitos armazenados aumenta ao longo da sua vida operacional (LUMBROSO *et al.*, 2019).

O planejamento construtivo dessas estruturas é geralmente realizado em etapas, as quais possuem forte dependência com a localização, material disponível e produção da empresa (DUARTE, 2008). A construção de uma barragem se inicia pelo dique de partida e pode ser

complementada por consecutivos alteamentos, implantados utilizando o próprio rejeito ou materiais externos oriundos de área de empréstimo ou de estéril de mina (REZENDE, 2013).

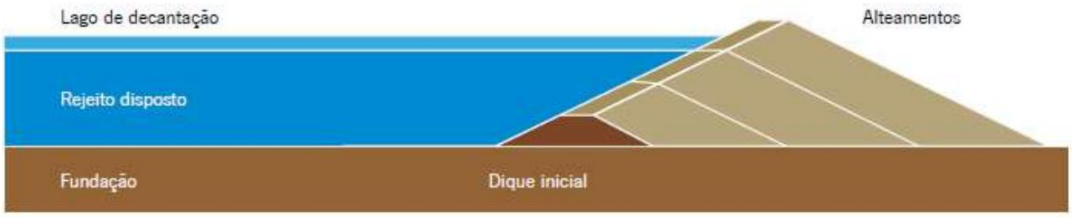
As principais técnicas construtivas de barramentos são:

- Método de jusante;
- Método de montante;
- Método de linha de centro.

2.2.1 -Método de Jusante

O método de jusante (Figura 1) corresponde a construção de um dique de partida a montante do qual são feitos os alteamentos seguintes, até que a cota final calculada em projeto seja alcançada (IBRAM, 2016). Os alteamentos são assentes parte sobre a fundação de solo e parte sobre o maciço anterior.

Figura 1 - Método construtivo de jusante



Fonte: IBRAM (2016).

As vantagens associadas ao processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação do solo, de acordo com técnicas construtivas convencionais, além de uma maior resistência aos efeitos dinâmicos, o que inclui forças sísmicas, conferindo maior segurança a estrutura (KLOHN, 1981 *apud* CARVALHO, 2018). A desvantagem central do presente método se refere ao custo de implementação, posto que demanda um grande volume de aterro, além de uma extensa área para sua construção.

Em um estudo desenvolvido por Jakka *et al.*, (2011), a estabilidade dinâmica de barragens de rejeitos a montante e a jusante foram avaliadas pelos softwares Quake/W e Slope/W da empresa GeoStudio ®. Este estudo relatou que as barragens de rejeitos a jusante são geralmente

mais estáveis do que as a montante. Isso se dá, principalmente, pelo fato de que o material de fundação do novo alteamento, composto por terreno natural passar por tratamento (retirada de material de baixa resistência) previamente à construção do maciço.

2.2.2 -Método de Montante

O método de montante foi bastante empregado em muitas barragens de rejeitos. Neste método, representado pela Figura 2, a estrutura do barramento é iniciada a partir de um dique de partida, sendo o rejeito lançado a montante da crista da barragem. A partir desse processo, forma-se uma praia de rejeito, a qual será utilizada como fundação da construção do próximo alteamento (CAVALCANTE, 2000).

Figura 2 - Método construtivo de montante.



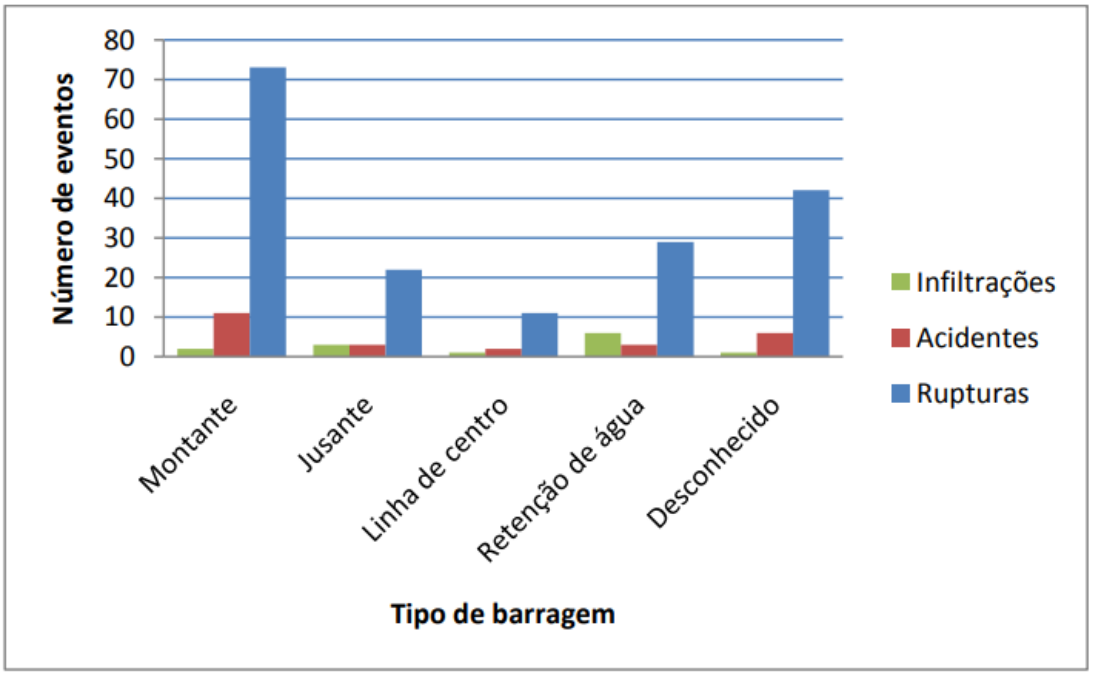
Fonte: REZENDE (2013).

Entre os três métodos de construção de barragens de rejeitos na prática atual, segundo Espósito e Duarte (2010), o método de montante é considerado o mais fácil e de menor custo. Por esta razão, tal método construtivo é a principal forma de disposição de rejeitos de mineração na China (WEI *et al.*, 2008).

Apesar do menor custo (em relação aos outros métodos), o método de montante apresenta desvantagens significativas relacionadas à segurança, principalmente no que se refere à: i) dificuldade de controle da superfície freática; ii) redução na capacidade de armazenamento do reservatório; iii) suscetibilidade ao piping; iv) superfícies erodíveis e v) probabilidade de liquefação (ESPÓSITO, 2000). De acordo com Rico *et al.*, 2008, dentre os métodos construtivos, o maior número de incidentes está relacionado ao método de montante.

Dados divulgados pela ICOLD (2001), apresentados no Gráfico 1, apontam a disparidade entre o número de incidentes que ocorrem com as barragens de rejeitos construídas a montante, em comparação a barragens de rejeitos construídas com outros métodos de alteamento, assim como compara com barragens de contenção de água. Segundo Dixon-Hardy e Engels (2007), isto se deve ao fato de que uma barragem de rejeitos a montante é constituída por diques construídos sobre rejeitos moles previamente depositados, o que pode levar a uma diminuição na estabilidade da barragem. A estabilidade da barragem, portanto, depende da resistência do aterro, das características dos rejeitos que compõem a fundação do alteamento e da manutenção de uma praia de rejeitos a uma distância mais segura da zona da estrutura (CAMBRIDGE; SHAW, 2019).

Gráfico 1 - Número de incidentes em relação ao método construtivo de barragem.



Fonte: *International Commission on Large Dams* (2001 *apud* VALERIUS, 2014).

2.2.3 - Método Linha de Centro

O método Linha de Centro, representado na Figura 3, constitui-se como uma solução intermediária entre os dois métodos anteriormente apresentados. Os alteamentos são construídos um sobre o outro, mantendo uma crista simétrica ao eixo da barragem, sendo que parte do aterro do alteamento fica sobre a praia de rejeitos e outra parte fica com a fundação à jusante do dique, o qual foi construído anteriormente (VALE, 2022).

Figura 3 - Método construtivo linha de centro.

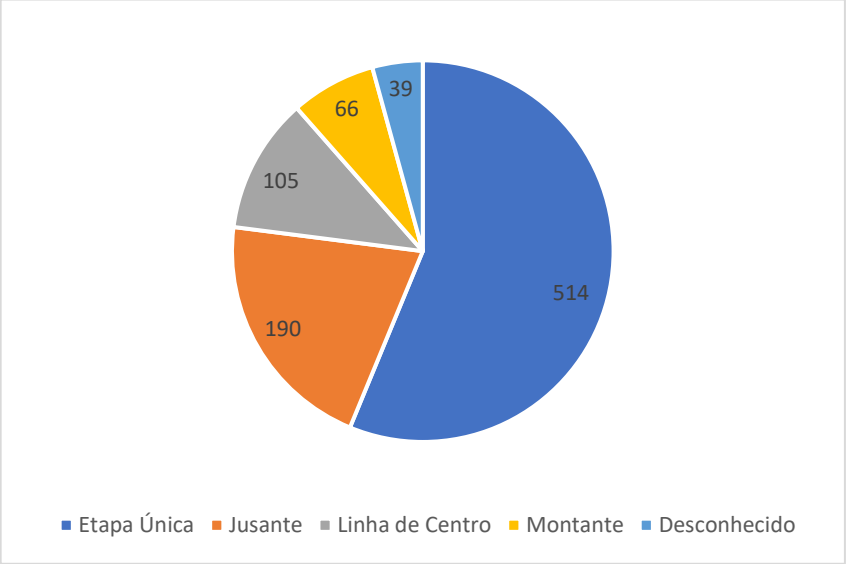


Fonte: IBRAM (2016).

Em termos de custo, é superior ao método a montante e inferior ao de jusante, por necessitar de uma menor quantidade de material compactado (NAEINI; AKHTARPOUR 2018). Neste caso, os alteamentos são feitos de forma que o eixo da barragem permaneça em sua posição inicial, ou seja, coincida com o eixo do dique de partida (VALE, 2022). Uma vantagem deste método é a possibilidade de construir um sistema de drenagem interna contínuo, o qual, teoricamente, possibilita um controle maior da linha freática (SILVA, 2010).

De acordo com Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), no Brasil, atualmente existem 105 barragens construídas pelo método linha de centro, o que representa cerca de 11,50% em relação ao número total de estruturas existentes no país e que estão cadastradas no sistema de monitoramento da ANM, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Número de barragens por método construtivo no Brasil em 2022.

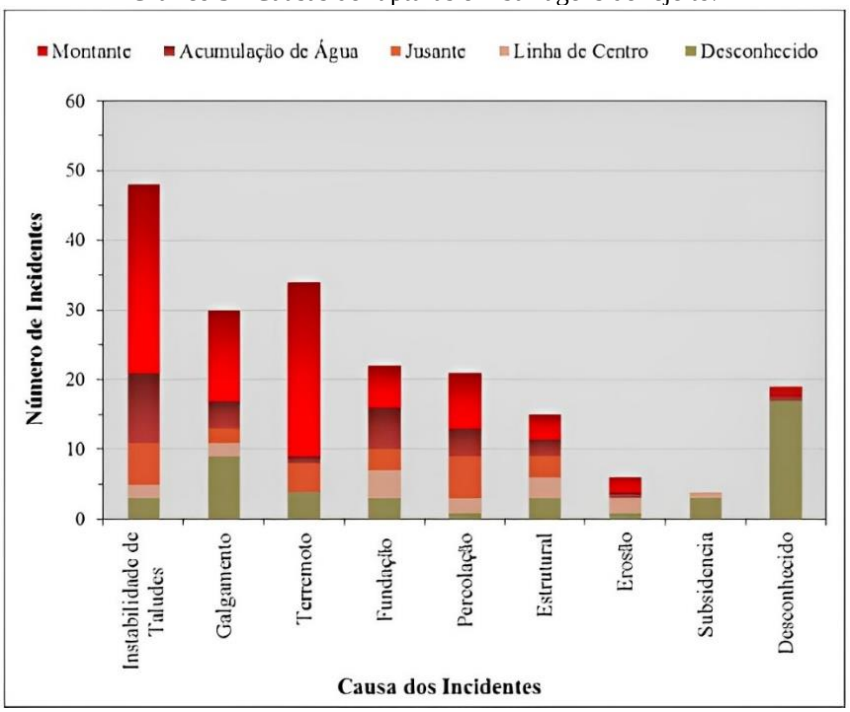


Fonte: adaptado de SIGBM (2022).

2.3 - Segurança de Barragem

A ICOLD (2001) compilou informações relacionadas às causas dos acidentes levantados para cada tipo de método construtivo de barragens. A instabilidade de talude e os terremotos são as duas maiores causas de rupturas em barragens de rejeitos, como pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Causas de rupturas em barragens de rejeito.



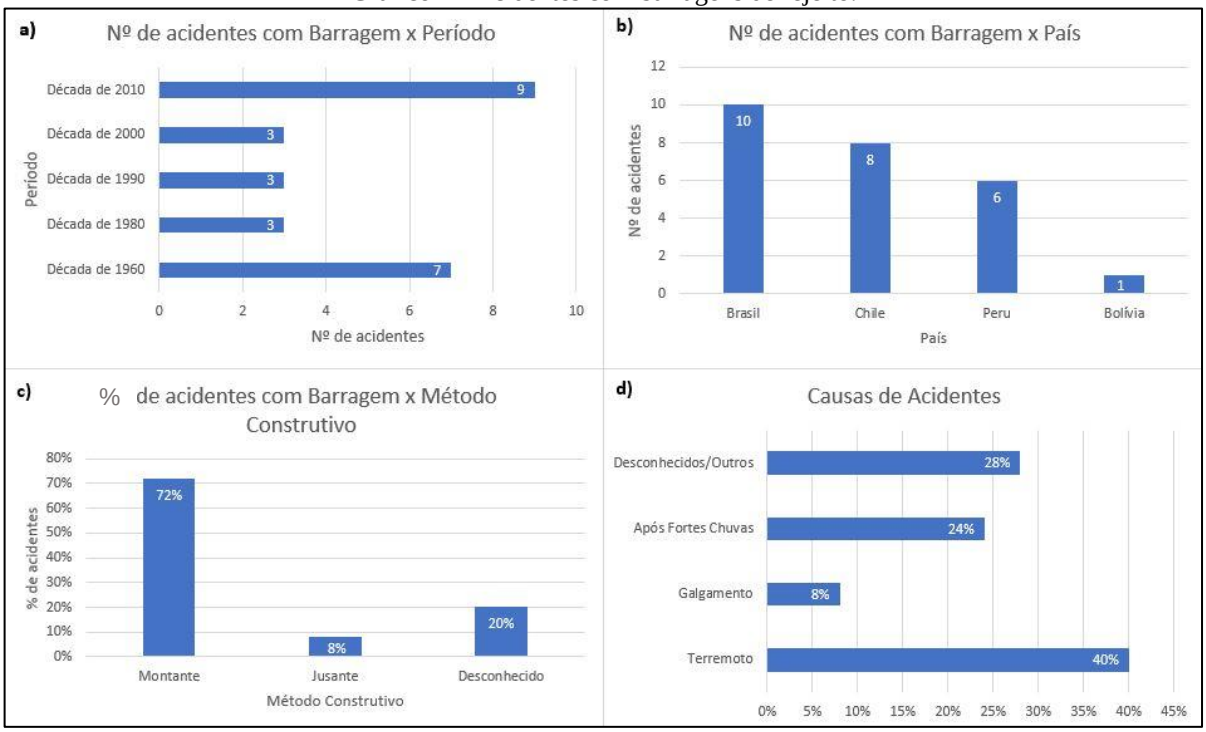
Fonte: International Commission on Large Dams (2001 *apud.* MACHADO; AZEEZ, 2018).

No Brasil, devido à baixa ocorrência de eventos sísmicos, a instabilidade de taludes gera grande preocupação com relação à segurança de barragens. Para o monitoramento deste fator, é necessário realizar ensaios para definição dos parâmetros geotécnicos, tanto dos rejeitos que são contidos, quanto do material que compõe o barramento e fundações, além de realizar análises de estabilidade, para que se tenha conhecimento do comportamento da estrutura (BONATTO, 2019).

Nas últimas décadas, tem-se observado uma maior frequência de rompimento de barragens, fato este averiguado em escala mundial, sendo, em média, dois eventos por ano, onde estes episódios, mesmo com todas as novas medidas reguladoras e fiscalizadoras que influenciam a área, vem a ocorrer. Vogel (2013) observa que a taxa anual de rupturas de barragens após o ano 2000 aumentou de cinco a seis vezes. A China é o país com o maior número rupturas em barragem de rejeitos, resultando na perda de muitas vidas e danos materiais consideráveis, incluindo poluição irreversível em áreas a jusante. Um exemplo é a ruptura ocorrida em 10 de agosto de 2008 na província de Shanxi, noroeste da China, a qual provocou 277 mortes (G YIN *et al.*, 2011).

Em um estudo elaborado por Freitas Neto *et al.*, (2022), os autores analisaram os acidentes de barragens de rejeitos de mineração na América do Sul nos séculos XX e XXI e avaliaram o cenário atual das barragens brasileiras. A partir da análise dos acidentes na América do Sul (Gráfico 4), observou-se que o país com maior frequência de acidentes foi o Brasil, e que a maior parte dos casos ocorreu na década de 2010. Segundo os autores, 40% dos acidentes tiveram como causa atividades sísmicas. Além disso, 72% das barragens que sofreram acidentes foram construídas pelo método de alteamento à montante, o que vai de encontro às informações divulgadas pela ICOLD (2001).

Gráfico 4 - Acidentes com barragens de rejeito.



a) Número de acidentes com barragem por período considerado; b) Número de acidentes com barragem por país; c) Percentual de acidentes com barragem de acordo com o método construtivo; d) Percentual das causas de acidentes em barragens de rejeitos.

Fonte: Adaptado de FREITAS NETO *et al.*, (2022).

O número de acidentes envolvendo barragens de rejeitos revela a necessidade de uma constante atualização no desenvolvimento de leis sobre a temática, principalmente no que tange o processo construtivo e o monitoramento dessas estruturas geotécnicas. Visando proporcionar uma observância dos padrões que englobam a segurança das barragens, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), busca reduzir a possibilidade de acidentes e suas potenciais consequências, além de regulamentar as ações de segurança que serão adotadas em todos os processos do empreendimento, desde o projeto até a possível desativação da barragem. A PNSB possibilita que o poder público fiscalize, controle, oriente e proponha métodos de correção, tendo como base as ações de segurança predispostas, propiciando o gerenciamento adequado das barragens e seguindo a natureza técnica e a gestão de riscos (FERNANDES, 2020).

Em atendimento ao art. 7° da Lei n° 12.334, a Resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH (BRASIL, 2012) dispõe sobre critérios gerais de classificações de barragens por categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e volume do reservatório.

A categoria de risco é classificada em alto, médio ou baixo, tendo como base o somatório de notas atribuídas, nas quais são consideradas as características técnicas da barragem, o seu estado de conservação e o Plano de Segurança das Barragens. Analogamente, o dano potencial associado também será classificado em alto, médio ou baixo, se correlacionando com o somatório de notas no que tange ao volume total do reservatório, à existência de população a jusante, ao impacto ambiental e ao impacto socioeconômico disposto no empreendimento.

No Brasil, após o acidente ocorrido em Mariana, em 2015, o então Departamento Nacional de Produção Mineral estabeleceu a Portaria n° 70.389 (BRASIL, 2017), que além de criar o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), determina o conteúdo mínimo de diversos documentos sobre as barragens de mineração, como o Plano de Ação de Emergência para Barragem de Mineração (PAEBM) e a Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB). Em 2020, após o rompimento da Barragem I, em Brumadinho, foi instituída a Lei n° 14.066 (BRASIL, 2020), que introduz importantes deliberações sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens.

A Agência Nacional de Mineração, no mês correspondente a fevereiro de 2022, publicou a Resolução nº 95/2022 (BRASIL, 2022), a qual vem a consolidar os atos normativos referentes à segurança de barragens de mineração no Brasil, tema este que possui notória importância, principalmente devido às tragédias já presenciadas no país. Dessa forma, a Resolução é o efeito de uma longa e transparente comunicação entre o órgão fiscalizador e os elementos interessados no setor de mineração. A normativa promove regras de segurança de barragens, as quais devem ser atendidas pelas empresas mineradoras, a fim de consolidar processos mais seguros. Sob tal ótica, reforçando as normativas antecedentes, promovendo modificações e um detalhamento mais preciso no que tange os dispositivos legais antes instaurados, a Resolução define os contextos em que as barragens de mineração entram em condição de alerta e emergência.

Nesta perspectiva, os atuais preceitos da Resolução ANM nº 95 reafirmam a relevância de se analisar, periodicamente, a segurança das barragens de mineração, tendo como alicerce as análises de estabilidade atualizadas e que evidenciam a situação atual de cada estrutura, conjuntamente a implementação eficaz de medidas de correção de anomalias que porventura forem identificadas nas inspeções do próprio empreendedor e/ou de consultoria externa. A partir dessa nova normativa, os parâmetros de relevância para a segurança de barragem são: estado de conservação geral da estrutura, Fator de Segurança ao deslizamento (segurança geotécnica), a borda livre em acordo ao projeto e o tempo de retorno mínimo para o

dimensionamento do sistema extravasor (segurança hidráulica). Eles constituem estímulos para uma possível entrada em situação de emergência da estrutura caso não sejam atendidos.

É importante destacar que a evolução histórica da regulamentação reduz, mas não elimina o risco de acidentes em barragens de rejeitos. Existem riscos de novos acidentes por não conformidade com as normas estabelecidas, falha na manutenção, projeto e construção, redução de custos, fatores meteorológicos e climáticos, rupturas de fundações, infiltrações e muitos outros (CARDOZO *et al.*, 2016).

2.4 - Conceitos Fundamentais Sobre Estatística e Confiabilidade

Para a elaboração de um estudo sobre análise de estabilidade probabilística, tema desta pesquisa, é fundamental a introdução de conceitos básicos de estatística e confiabilidade, descritos a seguir.

2.4.1 - Média

A média é a medida mais comum de tendência central e se refere ao valor médio de um grupo de números. A média é de suma importância, pois com base em seu conceito são calculadas outras medidas, como, por exemplo, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Segundo Triola (1999, *apud* PEREIRA, 2020), "a média aritmética é a mais importante de todas as mensurações numéricas descritivas". A média pode ser calculada pela Equação 1:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} xi}{n} \qquad [1]$$

Onde:

μ = média;

xi = variável aleatória individual;

n = número de amostras que compõem a população.

2.4.2 - Desvio Padrão

O desvio padrão, que por sua vez está relacionado com a variância amostral (PEREIRA, 2020), fornece informações sobre a variação existente em um grupo de valores e mede o desvio (diferença) da média do conjunto de dados (CAMPELLO, 2020). Assim, o desvio padrão é uma medida de variabilidade expressa nas mesmas unidades dos dados. Matematicamente, o desvio padrão é definido pela Equação 2, como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(xi - \mu)^2}{n - 1}} \qquad [2]$$

Onde:

σ = desvio padrão;

μ = média;

xi = variável aleatória individual;

n = número de amostras que compõem a população.

2.4.3 - Coeficiente de Variação

Uma medida ainda mais conveniente da dispersão é dada pelo coeficiente de variação (COV), que é a razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ), sendo uma quantidade adimensional (ANG; TANG, 2007), porém, geralmente é expressa em porcentagem. O COV mensura a variabilidade dos dados em relação à média global (PEREIRA, 2020), e pode ser calculado pela Equação 3:

$$COV = \frac{\sigma}{\mu}\, x\, 100\% \qquad [3]$$

Onde:

COV = coeficiente de variação;

σ = desvio padrão;

μ = média;

O coeficiente de variação tem sido bastante difundido em análises de variabilidade de propriedades geotécnicas (UZIELLI *et al.*, 2006 *apud* PEREIRA, 2020). Por ser uma medida adimensional, torna-se útil quando se pretende comparar a variabilidade de conjuntos com diferentes unidades de medida (BARBETTA *et al.*, 2010). Indica, ainda, a variação dos dados obtidos em relação à média, ou seja, quanto menor for o seu valor, mais homogêneo será o conjunto de dados.

Um compilado de pesquisas apresentado por Duncan (2000), apresenta a avaliação de diversos autores a respeito de coeficientes de variação para certos parâmetros geotécnicos dos solos. Segundo o mesmo autor, os intervalos de valores apresentados no Quadro 1 retratam referências aproximadas para se determinar o COV para uma dada situação.

Quadro 1 - Coeficientes de variação usuais por parâmetro geotécnico.

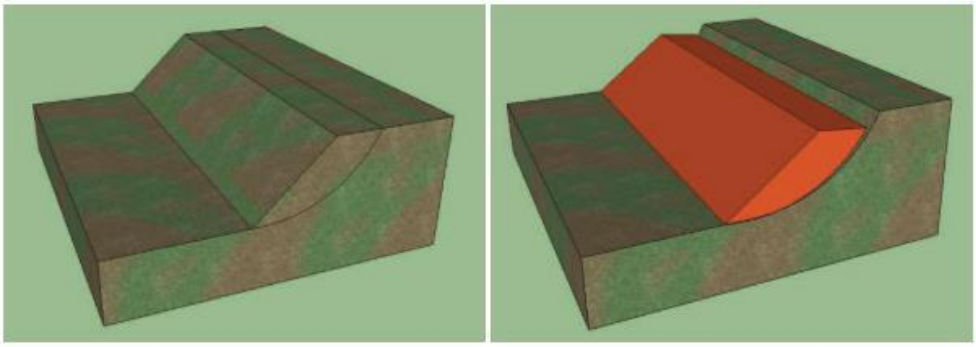
Propriedade ou Resultado de Ensaio de Campo	Coeficiente de Variação COV (%)	Origem
Peso específico (γ)	3 a 7	Harr (1984), Kulhawy (1992), Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Peso específico submerso (γsub)	0 a 10	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	2 a 13	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Coesão (c)	20 a 80	Sandroni e Sayão (1993)
Resistência ao cisalhamento não drenada (Su)	13 a 40	Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Parâmetro de resistência ao cisalhamento não drenada (Su/σ'v)	5 a 15	Lacasse and Nadim (1997) e Duncan (2000)
Índice de compressão (Cc)	10 a 37	Harr (1984), Kulhawy (1992) e Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila saturada (k)	68 a 90	Harr (1984) e Duncan (2000)
Coeficiente de permeabilidade de argila não saturada (k)	130 a 240	Harr (1984) e Benson *et al.*, (1999)
Coeficiente de adensamento (Cv)	33 a 68	Duncan (2000)
Índice Nspt	15 a 45	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistência de ponta elétrica (qc)	5 a 15	Kulhawy (1992)
Resistência de ponta mecânica (qc)	15 a 37	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Resistência não drenada - Ensaio de palheta (Sv)	10 a 20	Kulhawy (1992)

Fonte: Modificado de DUNCAN (2000).

2.5 - Análise de Estabilidade

Entende-se por taludes quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de solo, de rochas ou ambos. Segundo Silva (2013), os taludes podem ser naturais, como as encostas, ou artificiais, como os taludes de barragens. Com a expansão da sociedade, crescimento urbano e exploração de novas áreas, a demanda por obras que envolvem a construção ou a manutenção de taludes também aumentaram. Por esta razão, o estudo sobre os movimentos de taludes (Figura 4) e a respeito da estabilidade de taludes tem ganhado cada vez mais importância (FERREIRA, 2012).

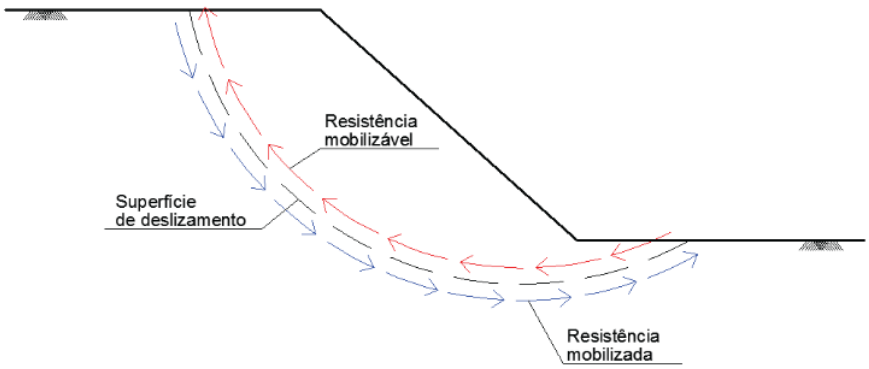
Figura 4 - Movimento de escorregamento de talude



Fonte: SILVA (2015).

A análise de estabilidade tem como objetivo aferir a possibilidade de ocorrência de ruptura do maciço em um talude artificial ou natural. Em tese, a análise é realizada por meio da comparação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura (GERSCOVICH, 2016), conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Resistência cisalhante mobilizada e resistência ao cisalhamento em taludes.



Fonte: SILVA (2015).

Para se concluir uma análise de estabilidade de um talude é importante o estudo do processo como um todo, onde integra-se as análises efetuadas em campo, com as realizadas em softwares técnicos comerciais. Em uma análise de estabilidade, os modelos a serem utilizados podem ser divididos em dois, os quais correspondem a: i) modelos probabilísticos e ii) modelos determinísticos (GIACON JUNIOR, 2018). O primeiro modelo (probabilístico) define a probabilidade existente de ruptura, a qual está associada a um Fator de Segurança (FS) que possui um grau de dispersão e número de dados disponíveis que afetam, sensivelmente, a probabilidade calculada. Por sua vez, o modelo determinístico é realizado tendo como base

métodos de Equilíbrio Limite que definem um Fator de Segurança único a partir de parâmetros geotécnicos médios, desprezando a variabilidade encontrada na natureza.

2.5.1 - Análise de Estabilidade Determinística

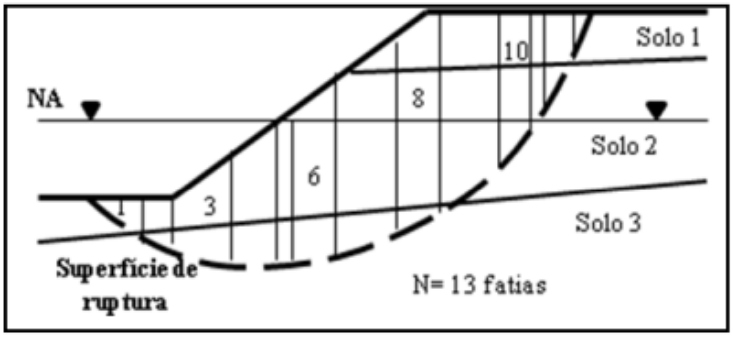
De acordo com Silva (2015), a análise de estabilidade determinística é quantitativa e expressa a condição de segurança de determinado talude sob a forma de um Fator de Segurança. O conceito utilizado para calcular o Fator de Segurança de estabilidade de taludes, segundo Duncan e Wright (2005), é:

$$FS = \frac{resistência\ ao\ cisalhamento}{tensões\ atuantes} \qquad [4]$$

As análises de estabilidade de taludes, ditas convencionais, são realizadas tendo como base os métodos de Equilíbrio Limite. O Equilíbrio Limite vem a se consolidar como o estado em que as forças ou momentos que possuem uma tendência a resistir ao deslizamento se balanceiam com as forças que tendem a produzir o deslizamento. Sob tal ótica, o FS, definido como a razão entre as presentes forças ou momentos, é igual a 1 em situação de Equilíbrio Limite e, quando superior a 1, tem-se o dito talude estável.

Segundo Abramson *et al.*, (2001), os métodos de Equilíbrio Limite para análise de estabilidade de taludes, diante das superfícies de ruptura consideradas compostas, decompõem a potencial superfície de ruptura em pequenas fatias, como pode ser observado na Figura 6, sendo que cada uma delas é afetada por um sistema de forças. Segundo os autores, há diversos métodos para solução de uma análise de estabilidade a partir do Equilíbrio Limite, sendo os principais métodos os: Método de Bishop Simplificado (BISHOP, 1955), Método de Janbu (1954a, 1954b, 1957 e 1973), Método de Spencer (1967 e 1973) e Método de Morgenstern-Price (1965). A Tabela 1 apresenta um resumo das características dos Métodos de Equilíbrio Limite supracitados.

Figura 6 - Processo de divisão da massa rompida em fatias.



Fonte: Modificado de ABRAMSON *et al.*, 2001.

Tabela 1 - Resumo das características dos Métodos de Equilíbrio Limite.

Método	**Superfície de Ruptura**	**Equação de Equilíbrio**			**Hipóteses**
		$\Sigma F_H = 0$	$\Sigma F_V = 0$	$\Sigma M = 0$	
Bishop Simplificado (1955)	Circular	Não	Sim	Sim	A superfície de deslizamento é circular, as forças nas laterais das fatias são horizontais (isto é, não existe forças cisalhantes entre as fatias).
Janbu Simplificado (1968)	Qualquer	Sim	Sim	Não	As inclinações das forças entre fatias são assumidas; as suposições variam de acordo com o procedimento.
Spencer (1967)	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Forças interfatias são paralelas, (isto é, todas possuem a mesma inclinação). A força normal atua no centro da base da fatia.
Morgenstern e Price (1965)	Qualquer	Sim	Sim	Sim	A força de cisalhamento entre fatias está relacionada à força normal entre fatias por X = ʎf(x)E; é assumida a posição da força normal (N) na base da fatia, geralmente no centro da base.

Fonte: Modificado de Duncan; Wright (2005).

Três condições de equilíbrio devem ser satisfeitas em cada fatia: (1) equilíbrio de forças verticais, (2) equilíbrio de forças horizontais e (3) equilíbrio de momentos. Conforme apresentado na Tabela 1, os métodos de Spencer e de Morgenstern-Price satisfazem todas as condições de equilíbrio e, por isso, são chamados de métodos rigorosos (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014).

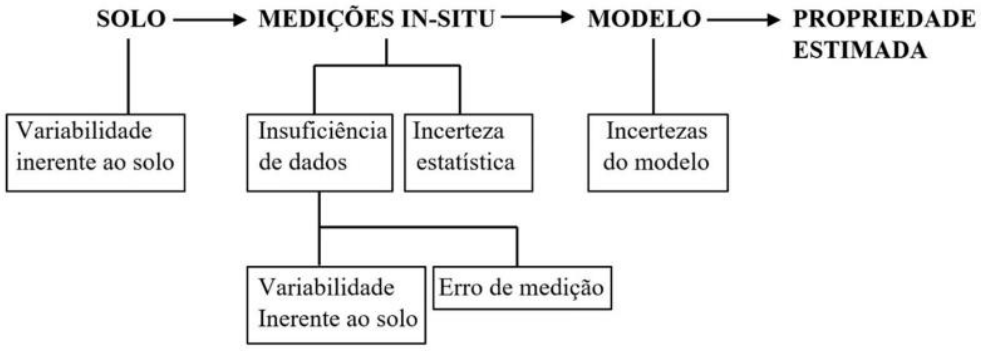
Dentre as limitações dos métodos de Equilíbrio Limite, destacam-se: (a) fundamentação dos métodos apenas em uma análise estática, desconsiderando deformações e distribuição de tensões; (b) adoção de tensões uniformemente distribuídas; (c) modelos de rupturas simples, desconsiderando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises (AGUILERA, 2009).

2.5.2 -Análise de Estabilidade Probabilística

A análise probabilística trata as análises de estabilidade de taludes de maneira mais completa, quando comparada à determinística, haja visto que na abordagem determinística utiliza-se uma estimativa para cada parâmetro de entrada, porém, constata-se que, na natureza, as propriedades dos materiais possuem a tendência de serem mais heterogêneas, o que pode vir a refutar a teoria de que o erro estimado obtido se equivale a zero e, quando isso ocorre, os taludes ditos como estáveis podem sofrer ruptura (MORALES, 2013).

As propriedades geotécnicas dos solos e das rochas são variáveis (Figura 7), uma vez que os depósitos naturais são formados por camadas irregulares, constituintes de distintos tipos de materiais, derivados de diferentes combinações mineralógicas (ANG; TANG, 2007). Dessa forma, há uma diferença nas propriedades de resistência, deformidade e permeabilidade distribuídas dentro do depósito.

Figura 7 - Incertezas na estimação de propriedades do solo.



Fonte: SOUSA (2021).

Frente a essa variabilidade, oscilações podem ocorrer nos valores adotados para os parâmetros geotécnicos (CAO *et al.*, 2017). Diante deste pressuposto, a incorporação de métodos probabilísticos se torna uma importante ferramenta para lidar com os riscos presentes em obras geotécnicas, posto que incorporam a variabilidade dos dados de entrada, tendo como base as distribuições estatísticas obtidas de literatura ou a partir de amostragem e ensaio do material constituinte do local de interesse. Tal abordagem possibilita calcular o risco de ruptura ou a confiabilidade das estruturas.

Nas últimas quatro décadas, diversos autores estudaram sobre a quantificação da variabilidade das propriedades do solo (PHOON; KULHAWY, 1999; PHOON *et al.*, 2006 *apud* CAMPELLO, 2020) para determinar o Índice de Confiabilidade (β) e a Probabilidade de Ruptura (PR) de encostas e taludes (GUO *et al.*, 2018; MOUYEAUX *et al.*, 2018).

A análise probabilística, em suma, representa um complemento do Fator de Segurança determinístico, quantificando incertezas pertinentes a este, tomando-se como base o Índice de Confiabilidade, o qual determinará a confiabilidade deste fator e a Probabilidade de Ruptura (TORRES FILHO, 2015). O cálculo do Índice de Confiabilidade e a Probabilidade de Ruptura refuta o falso conceito de que projetos com elevados valores de FS, consequentemente são mais seguros, o que não está genuinamente certo como apresentado por Sandroni e Sayão (1993).

A chance de ruptura existe em todo projeto de engenharia, ou seja, ainda que o projeto seja bem elaborado, haja um controle dos materiais aplicados e a execução siga rigorosamente o planejado, há sempre uma Probabilidade de Ruptura, mesmo que muito remota. A ruptura está relacionada ao desempenho inaceitável para o qual um projeto foi idealizado (SOUSA, 2021).

Em cada aspecto que se deseja analisar, é fundamental identificar um indicador de desempenho, ou seja, um fator crítico que, se não alcançado, caracterizará a ruptura (SILVA; SOUSA, 2017).

Em um talude, a ruptura significa obter um Fator de Segurança inferior a 1, que é um Fator de Segurança crítico o qual deve ser superado para que se atinja a estabilidade. A Probabilidade de Ruptura pode ser descrita pela Equação 5.

$$\mathrm{PR} = P(FS < 1) \qquad [5]$$

O Índice de Confiabilidade é obtido pela Equação 6 e denota o número de desvios padrão que afastam o Fator de Segurança determinístico calculado da situação de ruptura, quando este encontra-se abaixo de 1 (FS < 1).

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]} \qquad [6]$$

onde E[FS] = FS determinístico e σ[FS] = desvio padrão do FS.

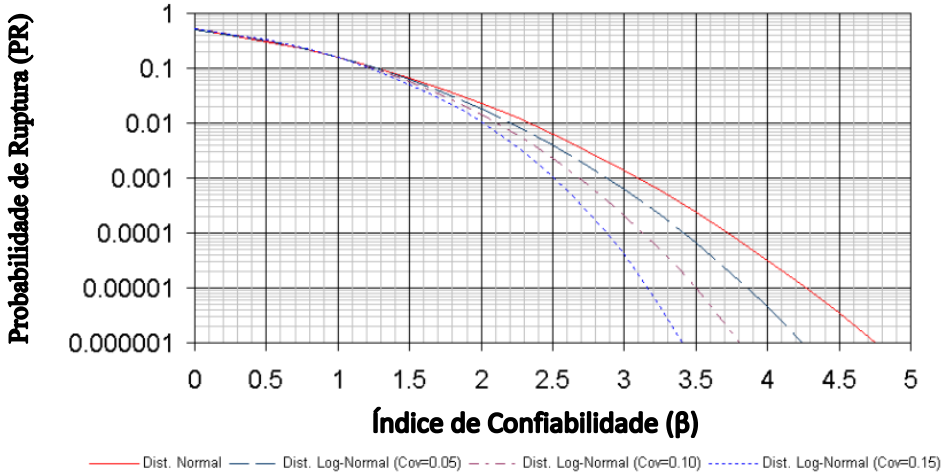
Quanto maior o valor de β, mais confiável e seguro é o projeto (WOLFF, 1996). A Probabilidade de Ruptura é uma função direta do Índice de Confiabilidade obtido pela Equação 6. Pode-se notar pela Equação 7 que a Probabilidade de Ruptura depende da distribuição de probabilidade adotada para o Índice de Confiabilidade.

$$PR = 1 - \Phi\beta \qquad [7]$$

onde Φ = distribuição gaussiana padrão.

O ábaco (Figura 8) apresentado por Dell'Avanzi e Sayão (1998, *apud* FLORES, 2008) fornece a relação entre β e PR para distribuições normal e log-normal, além de comparar diferentes valores de COV. Em uma pesquisa sobre análise de estabilidade probabilística de um talude, Flores (2008) constatou que, para valores de β pequenos, a Probabilidade de Ruptura é um pouco maior para uma distribuição de probabilidade normal. Assumir uma distribuição de probabilidade normal na ausência de dados é, portanto, agir a favor da segurança, pois a Probabilidade de Ruptura pode ser levemente superestimada. A distribuição normal também pode ser acatada nos casos em que o FS tem um tipo diferente de distribuição, mas apresenta $1,5 < \beta < 2,0$ (CHRISTIAN *et al.*, 1992 *apud* VECCI, 2018).

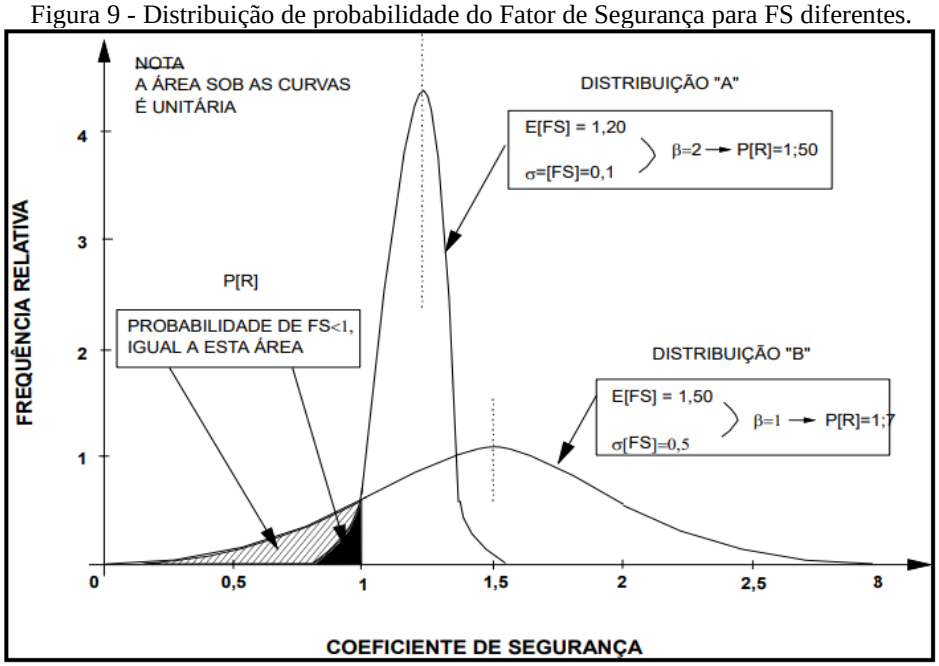
Figura 8 - Probabilidade de Ruptura versus Índice de Confiabilidade.



Fonte: Adaptado de FLORES (2008).

Para exemplificar melhor a importância das análises probabilísticas, SILVA (2015) mostra na Figura 9 duas curvas de distribuição do Fator de Segurança (A e B). A probabilidade de ruptura corresponde a área em que a curva apresenta valores abaixo de 1 (FS < 1). Como pode ser observado, o FS da curva B é superior ao da curva A, porém, o Índice de Confiabilidade (β) é menor, logo a área da curva em que o FS < 1 é maior, apresentando consequentemente uma maior Probabilidade de Ruptura.

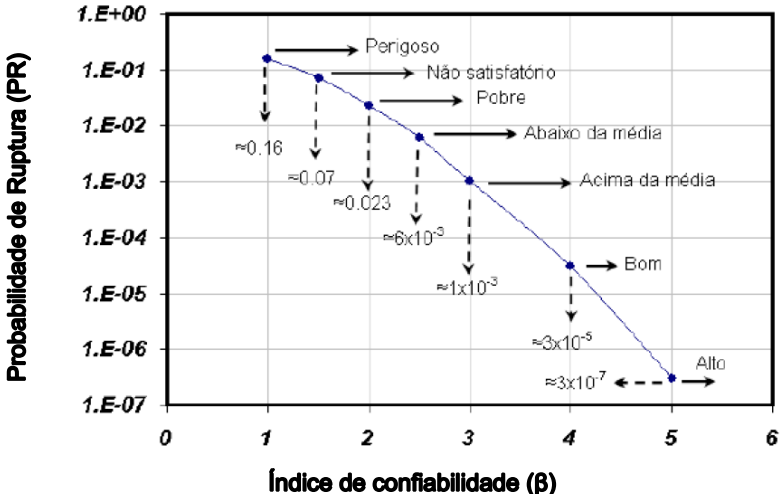
Figura 9 - Distribuição de probabilidade do Fator de Segurança para FS diferentes.



Fonte: Adaptado de ASSIS *et al*. (2012, *apud* SILVA, 2015).

A Figura 10 e Tabela 2 exibem diferentes níveis de aceitação de PR e β apresentados pelo US Army Corps of Engineers (1997) e por Dell'Avanzi e Sayão (1998), respectivamente.

Figura 10 - Níveis de aceitação de Índices de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura.



Fonte: Adaptado de USACE (1997).

Tabela 2 - Níveis de aceitação de PR e β.

CASOS	ÍNDICE DE CONFIABILIDADE	PROBABILIDADE DE RUPTURA
Fundações	2,3 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}
Taludes de Mineração	1,0 a 2,3	10^{-1} a 10^{-2}
Barragens	3,5 a 5,0	10^{-3} a 10^{-5}
Estruturas de Contenção	2,0 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}

Fonte: Adaptado de DELL'AVANZI e SAYÃO (1998).

2.5.2.1 - Monte Carlo

Dentre os diversos métodos probabilísticos disponíveis para resolução de problemas de engenharia, o Método de Monte Carlo é um dos mais comumente utilizados, por possibilitar a criação de um histograma de frequências dos resultados com a média e desvio padrão, determinando a probabilidade da ocorrência de um determinado evento (ANG; TANG, 2007; ARAUJO; SAYÃO, 2018) ou seja, as estatísticas do conjunto de valores resultantes da função podem ser computadas em β ou PR, sendo calculados de forma direta (BAECHER; CHRISTIAN, 2003).

Segundo Vecci (2018, p.38), o Método de Monte Carlo pode ser definido como:

> Uma técnica de amostragem estatística em que são gerados quantos valores aleatórios forem necessários para se descrever F(X) de forma que esta seja representativa da realidade. O resultado se torna mais preciso à medida que os números de valores gerados e de análises realizadas tendem a infinito.

Analogamente, como é inviável realizar infinitas simulações, um número mínimo (N) de simulações a serem realizadas foi sugerido por Harr (1984, *apud* VECCI, 2018), a ser calculado a partir da Equação 8.

$$N=\left(\frac{h_{\alpha/2}^2}{4\varepsilon^2}\right)^n \qquad [8]$$

Onde:

N = número mínimo de simulações para um determinado nível de confiança desejável (necessário)

$h_{\alpha/2}$ = índice em função do nível de confiança desejável, (Quadro 2; HARR, 1984);

ε = máximo erro permitido (em função do nível de confiança);

n = número de variáveis.

Quadro 2 - Índices de confiança para distribuição normal.

Nível de Confiança (%) (1-α)	**$h_{\alpha/2}$**	**Nível de Confiança (%) (1-α)**	**$h_{\alpha/2}$**
85,00	1,44	99,50	2,81
90,00	1,64	99,73	3,00
95,00	1,96	99,90	3,29
95,45	2,00	99,99	3,89
98,00	2,33	99,994	4,00
99,00	2,58	-	-

Fonte: Adaptado de HARR, 1984.

O Método de Monte Carlo é uma técnica poderosa, aplicável tanto a problemas lineares quanto não lineares, mas requer um grande número de iterações para garantir uma distribuição assertiva (GRIFFITHS*;* FENTON, 2007 *apud* SILVA, 2015).

Dentro das possibilidades da incorporação do presente método na geotecnia, torna-se possível a reprodução do comportamento de uma variável aleatória dependente (ex: FS), além da obtenção da Probabilidade de Ruptura (Equação 7), a qual uma barragem está submetida. Para tanto, é necessário ter como base o conhecimento da sua geometria, do desvio padrão de cada um dos parâmetros geotécnicos variáveis que compõem o maciço e fundação da estrutura e que influenciam no valor do Fator de Segurança, tais como o peso específico, ângulo de atrito, coesão, entre outros (VECCI, 2018).

De acordo com Wu *et al.*, (1997) o método de Monte Carlo é utilizado em alguns programas de análise de estabilidade de taludes, mas quando a Probabilidade de Ruptura vem a ser baixa, o número de simulações necessárias para obter um resultado preciso é tão alto que, exceto para problemas simples, torna-se impraticável. Os autores ainda ressaltam que apesar dessa limitação, o aumento da velocidade de processamento dos computadores favorece e potencializa a utilização desta metodologia (WU *et al.*, 1997).

2.5.2.2 - First Order Second Moment (FOSM)

O FOSM é um método de análise probabilística considerado simples, sendo definido como um método aproximado, uma vez que os parâmetros estatísticos da função de desempenho são obtidos por aproximação (HARR, 1984; BAECHER; CHRISTIAN, 2003). A metodologia se baseia no truncamento em primeira ordem da expansão da série de Taylor em torno dos valores médios das variáveis independentes envolvidas (CHRISTIAN *et al.*, 1992, *apud* VECCI, 2018).

Segundo Ang e Tang (2007, *apud* BRAGA, 2019), a média e variância são, simultaneamente, o primeiro e o segundo momento que determinam uma variável aleatória. Deste modo, pode-se definir uma função que calcula sucessivamente as derivadas de uma variável aleatória; tais derivadas definem seus momentos. Essas funções podem ser chamadas de funções geradoras de momentos ou funções de desempenho.

O Fator de Segurança de uma estrutura geotécnica é considerado uma função de desempenho $FS(\bar{X})$ (Equação 10), obtida a partir da média $(\bar{X})$ dos parâmetros geotécnicos $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ (Equação 9) definidos como variáveis independentes no cálculo do FS, exemplificados como coesão, ângulo de atrito, peso específico, resistência não-drenada, entre outros.

$$\bar{X} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n] \quad [9]$$

$$FS(\bar{X}) = G[\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n] \quad [10]$$

Demonstrando-se a expansão da função de desempenho $FS(\bar{X})$ através da série de Taylor ao redor do valor médio $(\bar{X})$, tem-se:

$$FS(X) = FS(\bar{X}) + \frac{FS'(\bar{X})}{1!}(X - \bar{X})^1 + \frac{FS''(\bar{X})}{2!}(X - \bar{X})^2 + \cdots \quad [11]$$

onde $FS'(\bar{X})$ e $FS''(\bar{X})$ representam, respectivamente, a primeira e segunda derivadas.

Após truncar-se a Equação 11 no segundo momento da série, ou seja, na derivada de primeira ordem e efetuar manipulação algébrica, o resultado é:

$$FS(X) - FS(\bar{X}) = FS'(\bar{X})(X - \bar{X})^1 \quad [12]$$

Ao elevar a Equação 12 ao quadrado e, novamente, efetuar manipulação algébrica, obtêm-se a variância do Fator de Segurança, como mostra a Equação 13.

$$V[FS(X)] = (FS'(\bar{X}))^2 . V(X) \quad [13]$$

A obtenção do Fator de Segurança envolve diversas variáveis independentes entre si, e não uma única, como pode ser visto na Equação 10. Portanto, de acordo com Harr (1984), a real variância do FS é calculada através do somatório do produto entre o quadrado das derivadas

parciais do FS em relação a cada parâmetro tido como variável e sua própria variância (Equação 14).

$$V[FS] = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\delta \mathrm{FS}}{\delta \mathrm{x_i}}\right)^2 . \mathrm{V[X_i]} \qquad [14]$$

A vantagem de empregar o método FOSM é a necessidade de se conhecer apenas os valores dos momentos das distribuições estatísticas (média e variância) dos parâmetros em análise (FALCÃO *et al.*, 2020). Uma desvantagem do FOSM é que a exigência de resolver derivadas parciais pode ter desdobramentos complexos e/ou impossíveis (SILVA, 2015).

Como a solução destas derivadas não é um procedimento simples, autores como Sandroni e Sayão (1993), Dell'Avanzi (1995), Vecci (2018) e Braga (2019) optaram pela aproximação das derivadas parciais recorrendo à metodologia das diferenças divididas, variando-se um parâmetro por vez e, fixando os demais, obtendo-se, portanto, um valor de FS para cada variação de parâmetro. Assim sendo, para n variáveis independentes, o método FOSM estabelece n+1 análises, ou seja, uma para os valores médios e outras n para determinar as derivadas ($\delta FS/\delta x_i$) de cada variável independente (FARIAS; ASSIS, 1998). A relação determinada pela divisão entre a variação do valor de FS e a variação de parâmetro (δx_i) que ocasionou esta alteração no FS subsidiam a aproximação de sua derivada parcial em relação a cada parâmetro (VECCI, 2018), como indica a Equação 15:

$$\frac{\delta FS}{\delta x_i} = \frac{\mathrm{FS}\,(\mathrm{x_i} + \delta \mathrm{x_i}) - \mathrm{FS}(\overline{\mathrm{x}}_\mathrm{i})}{\delta x_i} \qquad [15]$$

Ao estudar sobre a estabilidade de taludes de minas ou barragens por análises probabilísticas, diversos autores destacam a importância de se fazer δx_i pequena o suficiente para que $\delta FS/\delta x_i$ seja constante e independa do valor de δx_i e ainda aconselham que se utilize uma variação máxima de ±10% sobre o valor médio de cada parâmetro (DELL'AVANZI, 1995; FARIAS; ASSIS 1998; VECCI, 2018; BRAGA, 2019).

De acordo com Silva (2015), além de predispor a apuração da Probabilidade de Ruptura, o método FOSM vem a corroborar no cálculo de quais parâmetros geotécnicos (variáveis aleatórias) mais impactam na variação do Fator de Segurança, o que é uma vantagem em relação aos demais métodos probabilísticos. Conhecer os parâmetros geotécnicos que mais contribuem para variação do Fator de Segurança pode ser norteador para futuras tomadas de decisão, como por exemplo: a escolha do tipo de material para um reforço; escolha da área de empréstimo para construção de alteamentos ou tomada de decisão sobre o rebaixamento da linha freática. Além disso, possibilita o descarte das variáveis de menor ou nenhuma notoriedade no processo de obtenção da Probabilidade de Ruptura por outros métodos probabilísticos, como, por exemplo, a Simulação de Monte Carlo.

2.6 - Pesquisas Anteriores

O Quadro 3 apresenta uma síntese de alguns estudos probabilísticos aplicados à problemas geotécnicos diversos e que serviram de referência para a presente pesquisa.

Quadro 3 - Síntese de pesquisas anteriores.

AUTORES	ANO DE PUBLICAÇÃO	TÍTULO DA PESQUISA
Dell'Avanzi	1995	Confiabilidade e Probabilidade em Análises de Estabilidade de Taludes
Flores	2008	Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo
Sayão *et al.*	2012	*Considerations on the Probability of Failure of Mine Slopes*
Silva	2015	Análise de Estabilidade de um talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística
Araújo e Sayão	2018	Considerações Sobre Análise Probabilística em Estabilidade de Taludes de Barragem
Vecci	2018	Análises Probabilísticas de um Talude de Mineração
Braga	2019	Análises Probabilísticas de Estabilidade de uma Barragem de Rejeito
Mendes	2019	Análise Probabilística do Potencial de Falha por Liquefação Estática e Dinâmica de Barragens
Silva	2021	Avaliação Probabilística da Estabilidade de uma Barragem de Rejeitos
Bertozzi *et al.*	2021	Análises Probabilística e Determinísticas da Estabilidade de um Talude na Cidade de Lavras/MG
Monteiro *et al.*	2021	Análise Probabilística e Determinística da Estabilidade de Taludes em Barragem de Terra do Estado do Ceará

Fonte: Autor.

Braga (2019) realizou um estudo aplicando análises probabilísticas para avaliar a estabilidade de taludes com base no caso de ruptura de uma barragem de rejeitos. Foram avaliados dois cenários, sendo o primeiro para análise em tensão total, e o outro, em tensão efetiva. Este adotou o método FOSM e os resultados foram de probabilidades de ruptura aproximadas de 1/3,5 e 1/312,5 para cada análise, respetivamente. A principal vantagem do método probabilístico em relação ao determinístico foi a obtenção de um maior volume de informação, permitindo melhor entendimento do comportamento do talude e a possibilidade de refinamento da condição de estabilidade da barragem. Em estudo semelhante, Vecci (2018), comparou cinco métodos determinísticos convencionais e três probabilísticos (FOSM, Estimativas Pontuais (EP) e MC) em talude de mina de 200 m de altura. A autora concluiu que a aplicação do FOSM com base no método de Morgenstern-Price é mais recomendada em análises semelhantes ao caso estudado, quando comparado aos demais métodos probabilísticos e determinísticos utilizados.

Sayão *et al.* (2012) avaliaram os métodos probabilísticas e determinísticos da estabilidade de uma grande escavação de mina no Brasil, destacando que, dependendo da altura do talude, os parâmetros de atrito e coesão podem ser variáveis importantes no controle da estabilidade, enquanto a poropressão tem menor importância relativa, no talude avaliado pelos autores. Neste estudo de caso, os pesquisadores enfatizaram que o aumento na capacidade do sistema de drenagem horizontal pode ter eficiência limitada na estabilização de taludes potencialmente inseguros, e que variáveis sem efeito significativo na estabilidade do caso estudado, como o peso específico do solo, podem ser consideradas parâmetros determinísticos.

A limitação dos métodos determinísticos nas análises de estabilidade de taludes foi apontada por Flores (2008), uma vez que não se considera as ponderações apresentadas nos parâmetros de entrada, sendo a inserção dos métodos probabilísticos uma possível solução para superar essas adversidades. O estudo comparou dois métodos probabilísticos, Estimativas Pontuais e FOSM, e concluiu que o Método FOSM é mais fácil de usar e melhor se adequa para aplicação em projetos geotécnicos.

Dell'Avanzi (1995) avaliou a Barragem de Santa Branca, estado de São Paulo, usando o método FOSM e constatou que os métodos de Equilíbrio Limite ditos rigorosos (Spencer e Sarma) apresentavam valores de PR inferiores aos métodos simplificados de Janbu e Bishop. Em complemento ao estudo deste autor, Araújo e Sayão (2018) compararam o método FOSM a outros métodos probabilísticos, baseados no método de Equilíbrio Limite de Spencer,

concluindo que a PR é maior no método FOSM e MC em relação ao método EP, além de observar que a coesão efetiva foi o parâmetro de maior influência na variância do Fator de Segurança no método FOSM, para a mesma Barragem de Santa Branca.

Silva (2021) utilizou métodos de Equilíbrio Limite associados à métodos numéricos e abordagens probabilísticas (FOSM e MC) para avaliar a estabilidade de uma barragem de rejeitos de mineração de ferro. Os resultados demonstraram que a consideração de uma superfície de ruptura livre foi relevante na influência dos parâmetros na PR.

Silva (2015) utilizou a análise de estabilidade de talude probabilística em complemento às análises determinísticas tradicionais, com objetivo de destacar as vantagens desta, considerando a variabilidade dos parâmetros e calculando a Probabilidade de Ruptura para gerenciamento de riscos em projetos. A pesquisadora utilizou o método de Monte Carlo, FOSM e das Estimativas Pontuais, observando que o de Monte Carlo permitiu maior flexibilidade nas simulações de superfícies de ruptura além da superfície crítica determinística. Ainda, notou que o talude apresentou um Fator de Segurança elevado na análise determinística e baixa Probabilidade de Ruptura nos métodos probabilísticos.

Com a finalidade de avaliar a liquefação de barragens de rejeitos na indústria minerária, Mendes (2019) desenvolveu uma metodologia probabilística, utilizando os métodos FOSM, EP e Monte Carlo para avaliação do Fator de Segurança e a Probabilidade de Ruptura. O trabalho considerou três cenários para avaliação: a de ocorrência do gatilho de liquefação; a de mobilização da resistência não drenada de pico e mobilização da resistência não drenada de liquefeita. O método EP apresentou maiores valores para o Fator de Segurança, quando comparado com o FOSM, mas com o mesmo desvio padrão. Já o de Monte Carlo mostrou valores médios e desvio padrão significativamente maiores.

Bertozzi *et al.*, (2021) e Monteiro *et al.* (2021) abordam a importância da inclusão das análises probabilísticas nas análises de estabilidade de taludes urbanos e de barragens de terra, reconhecendo as limitações dos métodos determinísticos tradicionais. Ao utilizar os métodos probabilísticos, como Monte Carlo e FOSM, em comparação com o determinístico de Equilíbrio Limite, Bertozzi *et al.*, (2021) identificaram divergências em relação à segurança da estrutura. Enquanto os valores de Probabilidade de Ruptura encontrados ($0{,}91\% \leq PR \leq 8{,}58\%$) ficaram abaixo da média, conforme sugerido por USACE (1997) na Figura 10, os métodos determinísticos resultaram em Fatores de Segurança elevados ($FS \approx 2{,}4$). Já Monteiro *et al.*

(2021), ao avaliar a estabilidade do talude de montante de uma barragem de terra durante sua fase final de construção, notou que a metodologia probabilística auxilia no cálculo da Probabilidade de Ruptura intrínseca nos projetos de engenharia, contrapondo a ideia equivocada de que altos Fatores de Segurança implicam, necessariamente, em projetos mais seguros.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Estudo de Caso

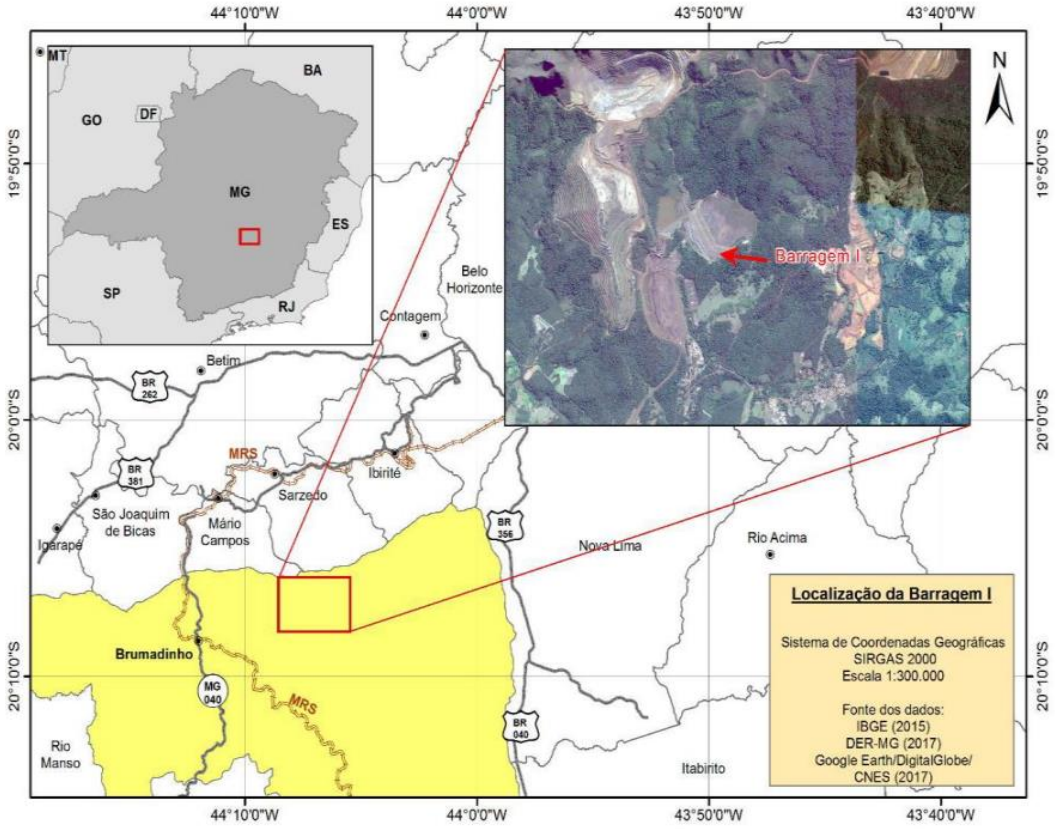
O presente trabalho é definido como um estudo probabilístico baseado em um caso real de uma barragem de rejeitos, onde toda documentação disponível é de domínio público. Trata-se da Barragem I, a qual estava localizada na Mina Córrego do Feijão em Brumadinho, Minas Gerais, a estrutura era uma barragem de rejeitos que iniciou suas operações na década de 70, construída majoritariamente utilizando-se a metodologia de alteamento à montante, cujos registros oficiais contabilizam dez etapas de alteamento, alcançando altura final com cerca de 86 metros. Destaca-se que este trabalho não tem como objetivo avaliar questões relacionadas à potencial responsabilidade corporativa, técnica ou pessoal pelo rompimento da barragem.

3.1.1 - Histórico da Estrutura

Os rompimentos de barragens de rejeitos costumavam ser considerados eventos raros, mas nos últimos 20 anos, o número de rupturas de barragens de rejeitos aumentou consideravelmente. Apenas nos últimos sete anos, o Brasil enfrentou dois grandes desastres envolvendo o rompimento de rejeitos de ferro: rompimentos da barragem de Fundão em 2015 e da Barragem I de Brumadinho em 2019 (ARMSTRONG *et al.*, 2019), sendo esta última o objeto de estudo desta dissertação.

A Mina Córrego do Feijão, de propriedade da empresa Vale S.A, faz parte do Complexo Paraopeba, incorporando a cidade de Brumadinho, localizada no estado de Minas Gerais. A Figura 11 apresenta o mapa de localização da barragem.

Figura 11 - Mapa com localização da Barragem I.



Fonte: TUV SUD (2018).

As atividades mineradoras em Córrego do Feijão iniciaram-se em 1923 pela Companhia Brasileira de Mineração e Metalurgia (Ferteco Mineração S.A.), cuja maior parte das ações foi comprada pela Vale em 2001 (RUCHKYS *et al.*, 2019). A disposição de rejeito na Barragem I, construída por sucessivos alteamentos a montante, iniciou-se em 1974 (GOMES, 2009).

Segundo o documento "Revisão Periódica De Segurança De Barragem (RPSB) da Mina Córrego Feijão – Barragem I Relatório Técnico" de 24/08/2018, elaborado pela empresa TUV SUD, a Barragem I tinha como função principal a contenção de rejeitos gerados no processo de beneficiamento da Instalação de Tratamento de Minério da Mina Córrego do Feijão.

De acordo com a RPSB elaborada pela TUV SUD em 2018, a construção da Barragem I foi executada em diversas etapas e por vários projetistas e empreiteiros. O projeto do dique inicial foi criado por uma empresa alemã em 1974 e sua implantação foi finalizada em 1976. A Barragem I foi idealizada para possuir alteamentos sucessivos para montante. A segunda projetista da Barragem I elaborou o projeto de 5 etapas de alteamentos, com 3 m de altura cada, pelo método de montante até a Elevação 889,0 metros, utilizando o próprio rejeito lançado no

reservatório como material de construção, sendo que estas etapas constituíam o segundo alteamento. O terceiro alteamento foi executado em duas etapas (7 e 8), nos anos de 1991 e 1993. A projetista do quarto ao oitavo alteamento, elaborou os projetos com alturas variáveis, porém, todos executados pelo método de montante, durante os anos de 1995 a 2004. Por fim, o 9° e 10° alteamentos foram projetados e executados nos anos de 2008 e 2013 nas elevações 937m e 942m, com 7,5m e 5,0m de altura, respectivamente. O sequenciamento do projeto e construção está resumido no Quadro 4.

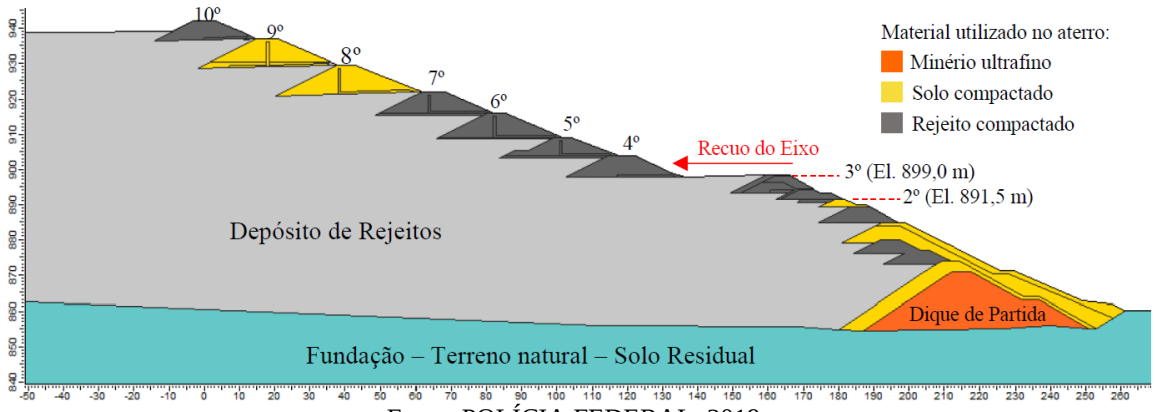
Quadro 4 - Sequência construtiva da Barragem I.

Etapa	Ano	Alteamento	Elevação (m)	Altura Máxima (m)	Tipo de Alteamento	Projetista
1	1976	Dique Inicial	874	18	Dique Inicial	Empresa A
2	1982	2º	877	21	Montante	Empresa B
3	1983		879	23	Montante	
4	1984		884	28	Linha de Centro	
5	1986		889	33	Montante	
6	1990		891,5	35,5	Montante	
7	1991	3º	895	39	Montante	Empresa C
8	1993		899	43	Montante	
9	1995	4º	905	49	Montante	Empresa D
10	1998	5º	910	54	Montante	
11	2000	6º	916,5	60,5	Montante	
12	2003	7º	922,5	66,5	Montante	
13	2004	8º	929,5	73,5	Montante	
14	2008	9º	937	81	Montante	Empresa E
15	2013	10º	942	86	Montante	

Fonte: Adaptado de TUV SUD, 2018.

Vale ressaltar que no desenvolvimento do projeto do 4º alteamento, a empresa contratada constatou que o Fator de Segurança da estrutura em condições de operação não atendia ao recomendado pelas boas práticas de engenharia, com valor inferior a 1,3. Detectou-se ainda surgências na região do maciço inicial próximo à elevação 875,0m. Por essas razões, o eixo da estrutura foi deslocado em direção à montante, formando uma berma extensa com largura variável na elevação 899,0m, conforme Figura 12. O intuito do projetista em alargar a berma era aumentar o Fator de Segurança da barragem.

Figura 12 - Seção que ilustra o sequenciamento construtivos da Barragem I.



Fonte: POLÍCIA FEDERAL, 2019.

Em 2015 a barragem parou de receber rejeitos provenientes do processo minerário e, no mês de julho de 2016 a disposição de rejeitos na planta passou a ser realizada de forma a seco, ou seja, a estrutura foi desativada. Frente a tal contexto, em 2018, a Superintendência de Projetos Prioritários do Governo de Minas Gerais (SUPPRI), órgão vinculado à Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD) decidiu positivamente frente ao pedido da Vale sobre a recuperação de finos da Barragem I do complexo Córrego do Feijão (SUPPRI, 2018), com intuito de aproveitar a quantidade de minério existente no reservatório. Em 2019, ano do rompimento, a barragem contava com 86 metros de altura e 720 metros de comprimento de crista (TUV SUD, 2018; VALE, 2019a).

O sistema de monitoramento da Barragem I era composto por 194 instrumentos ativos, sendo 37 indicadores de nível d'água, 93 piezômetros, 7 marcos superficiais, 2 inclinômetros, 53 pontos de medição de vazão em saída de drenos, 1 medidor de vazão residual e 1 pluviômetro (TUV SUD, 2018; VALE, 2019b), além de um sismógrafo e um radar interferométrico instalado em dezembro de 2018. A Figura 13 mostra uma vista aérea da Barragem I em junho de 2014.

Figura 13 - Vista aérea da Barragem I.



Fonte: TUV SUD (2018).

De acordo com o registro público da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2018 a Barragem I da Mina Córrego do Feijão era classificada como classe B, sendo a categoria de risco baixa e o dano potencial associado alto, como mostra o Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação da Barragem I da Mina Córrego do Feijão.

RESUMO DA CLASSIFICAÇÃO - BARRAGEM I			
Responsável Técnico pela Classificação		TUV SUD Bureau de Projetos	
Data		20/07/2018	
Características Técnicas (CT)		20	
Estado de Conservação (EC)		2	
Plano de Segurança de Barragem (PS)		2	
Pontuação Total da Categoria de Risco (CRI)		15	
Pontuação Total do Dano Potencial Associado (DPA)		22	
Categoria de Risco		Baixo	
Dano Potencial Associado		Alto	
Classe		B	
CATEGORIA DE RISCO	**DANO POTENCIAL ASSOCIADO**		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	**B**	C	E

Fonte: Adaptado de TUV SUD, 2018.

De acordo com Viana da Fonseca *et al.*, (2022), a topografia pós-ruptura feita com a tecnologia LiDAR indica que 9,7 milhões m³ de material foram perdidos da barragem, o que corresponde a aproximadamente 75% do volume pré-ruptura, causando um dano catastrófico a jusante. Tal acontecimento é considerado uma das tragédias mais dramáticas dos últimos anos

no Brasil, deixando mais de 250 mortos e cerca de 11 pessoas desaparecidas (THOMPSON *et al.*, 2020).

O Painel de Especialistas (ROBERTSON *et al.*, 2019) é um grupo constituído por profissionais de renome internacional, teve como objetivo avaliar as causas do rompimento da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão. O Painel elaborou um relatório evidenciando que, embora os drenos de pé e os tapetes drenantes tenham sido construídos em parte dos alteamentos, a drenagem interna da barragem foi pouco eficiente, contribuindo para altos níveis de água no interior da estrutura. O Painel ainda menciona a inclinação do talude de montante, a falta de gerenciamento da água dentro do reservatório, o recuo no quarto alteamento, a queda de resistência pós-pico e a precipitação regional alta e intensa nas estações chuvosas, como causas para a ruptura.

Dias após o desastre de Brumadinho, o Governo do Estado de Minas Gerais e o Ministério Público (MPMG) congelaram R$ 11 bilhões dos ativos da Vale, e o órgão ambiental responsável pelo licenciamento do empreendimento, IBAMA, bloqueou mais R$ 250 milhões (VALE, 2019c). Em 1º de março de 2019, o Ministério Público Federal, o Ministério Público do Estado de Minas Gerais, a Polícia Federal e a Polícia Civil do Estado de Minas Gerais recomendaram o afastamento de executivos e funcionários de diversos níveis organizacionais da empresa (VALE, 2019b).

3.1.2 - Características Geológico-Geotécnicas

A Mina de Córrego do Feijão, onde estava localizada a Barragem I, encontra-se em um terreno dominado por solos de alteração gnáissica, recobertos por coluviões lateríticos. Regionalmente, a mina faz parte do alinhamento de serra, conhecido como Serra do Curral, a qual define a parte norte do Quadrilátero Ferrífero. Na região da Barragem I o maciço rochoso é representado por gnaisses bandados, sendo a área do barramento capeada por horizonte de material terroso, constituído de solos saprolitos/residual/coluvionar. Estes solos mostram boa capacidade de suporte e baixa permeabilidade (TUV SUD, 2018).

A maior parte do maciço dos diques de alteamento encontrava-se apoiada sobre os rejeitos depositados no reservatório que, de maneira geral, eram compostos por materiais silto-arenosos

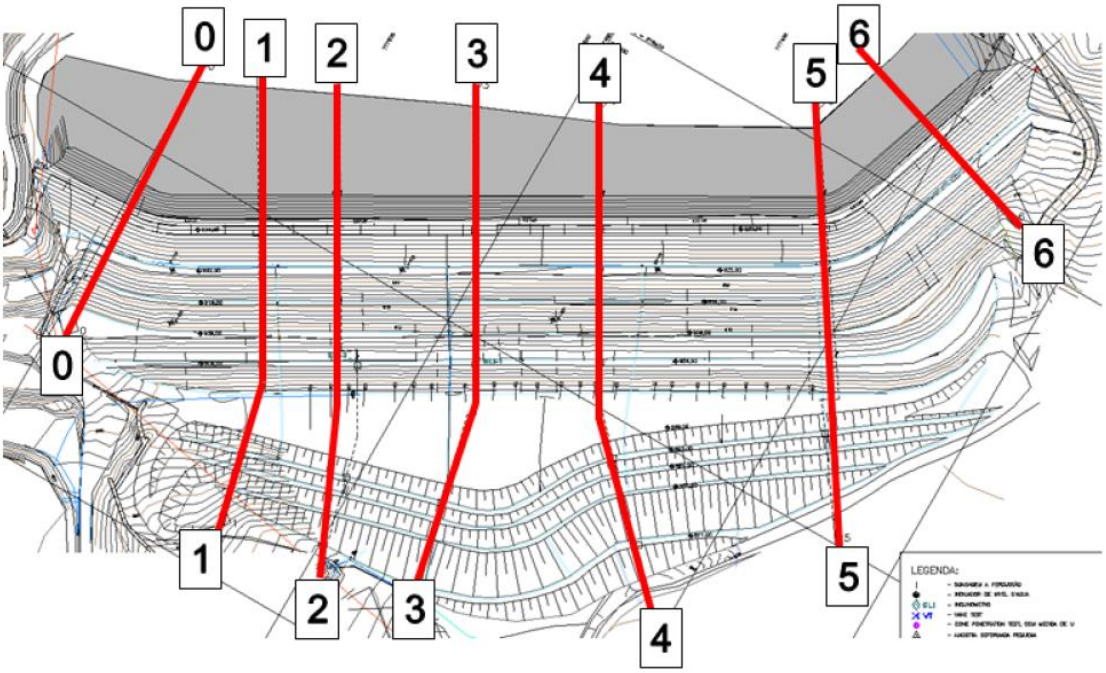
e areno-siltosos não plásticos. As informações referentes à fundação da estrutura são escassas, mas trata-se de um material silto-argiloso com índice de penetração (NSPT) entre 5 e 11 golpes, recobrindo o horizonte de solo saprolítico mais resistente com NSPT variando entre 15 e 40 golpes (TUV SUD, 2018).

Conforme mencionado no item 3.1.1, a Barragem I foi alteada em sua maior parte pelo método de montante, sendo o rejeito granular compactado o material constituinte destes diques, com exceção dos 8º e 9º alteamentos, os quais foram construídos com solo compactado.

3.1.3 - Seção-Tipo da Barragem

De acordo com a RPSB, elaborada em 2018 pela TUV SUD, a Barragem I era monitorada por meio de 7 seções instrumentadas, nomeadas de 0-0 a 6-6 (Figura 14), sendo que a seção 4-4 se configura como a seção-tipo mais desfavorável em termos de estabilidade, ou seja, representa a maior altura do maciço. Por esse motivo, a seção 4-4 foi utilizada como objeto de estudo na presente pesquisa.

Figura 14 - Seções instrumentadas da Barragem I.



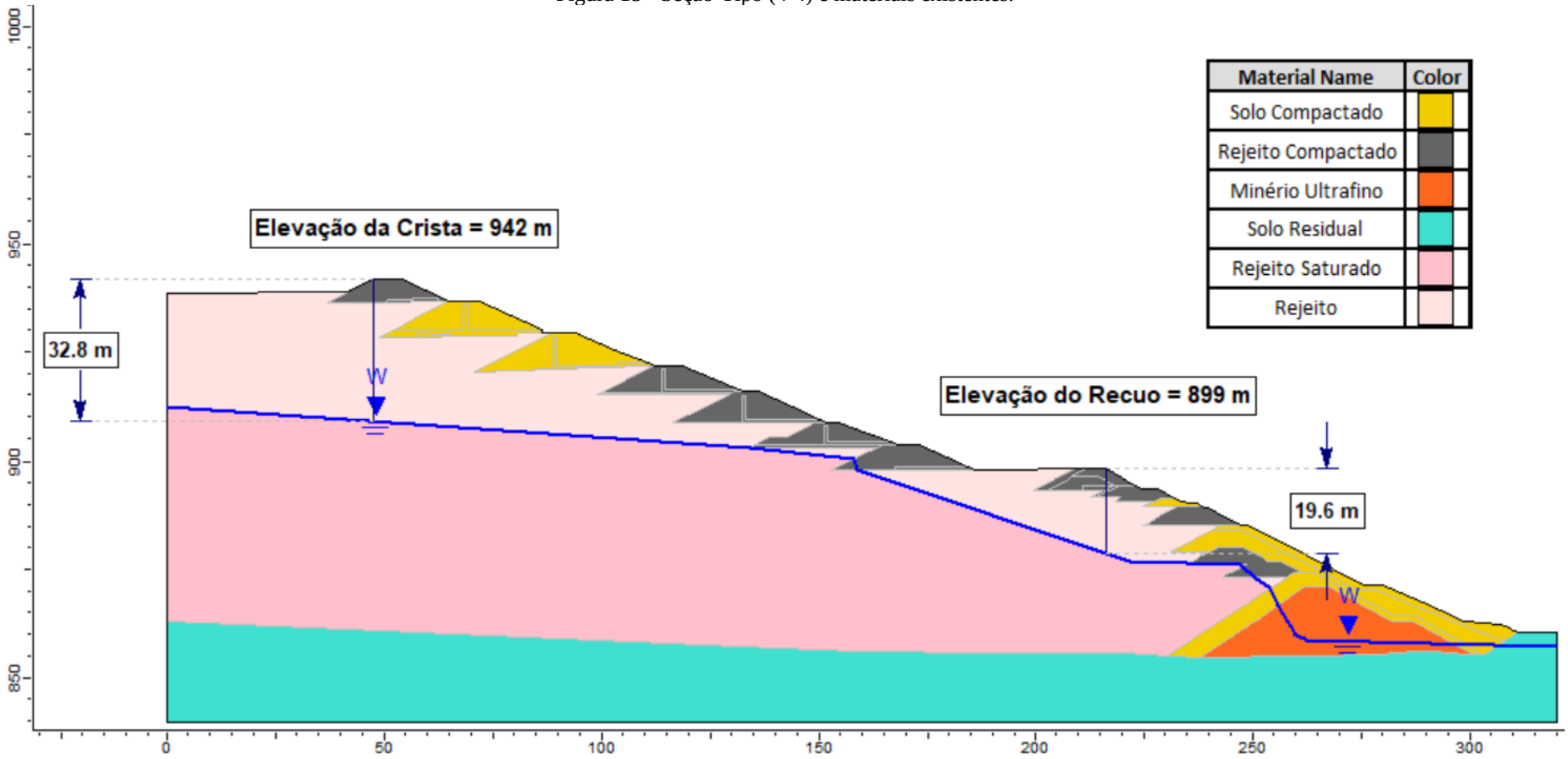
Fonte: TUV SUD, 2018.

Os parâmetros não-drenados da Barragem I foram discutidos no Relatório da 3ª Reunião do Painel Internacional de Especialistas (PIESEM-I) realizada em 2018. Após interpretar os resultados de treze testes CPTu executados em duas diferentes campanhas, no ano de 2005 e 2016, os rejeitos saturados da Barragem I foram considerados suscetíveis à liquefação (POLÍCIA FEDERAL, 2019 *apud* D'HYPPOLITO, 2023). Portanto, nesta pesquisa, os materiais presentes na seção são: solo residual, solo compactado (maciços), rejeito compactado (maciços), minério ultrafino (dique de partida), rejeito saturado e rejeito, conforme apresentado na Figura 15.

A Figura 16, retirada na íntegra da RPSB (TUV SUD, 2018), representa a linha freática existente na seção 4-4, a qual foi obtida por meio de leituras dos piezômetros e indicadores de nível d'água (INAs) presentes na estrutura, atualizados até março de 2018.

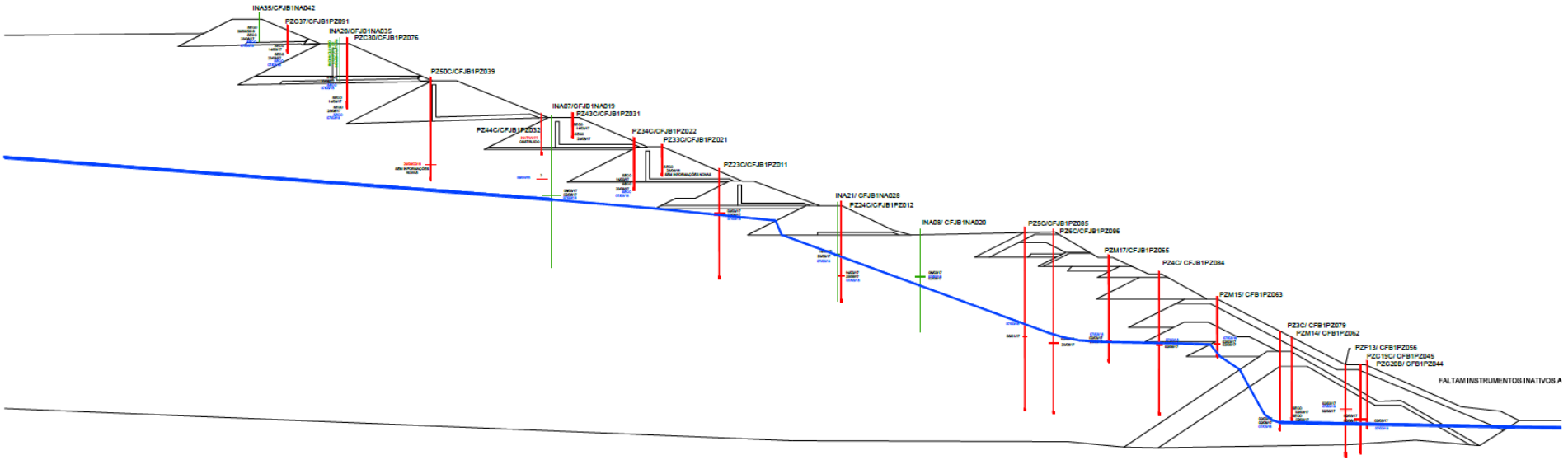
Vale ressaltar que a seção crítica (4-4) e o nível d'água encontrados pela TUV SUD (2018) e utilizados nesta pesquisa são equiparáveis aos obtidos pelo Painel de Especialistas (ROBERTSON *et al.*, 2019) para a seção 3-3, conforme pode ser observado nas Figuras 17 e 18. A seção 4-4 também foi utilizada por Braga (2019) e D'Hyppolito (2023) em suas pesquisas. A última pesquisadora ainda faz referência a relatórios importantes (ROBERTSON et al., (2019), CPI CÂMARA (2019) e POLÍCIA FEDERAL (2019)) sobre a Barragem I, os quais confirmam que a seção 4-4 seria a seção mais crítica no que concerne ao Fator de Segurança mínimo.

Figura 15 - Seção-Tipo (4-4) e materiais existentes.



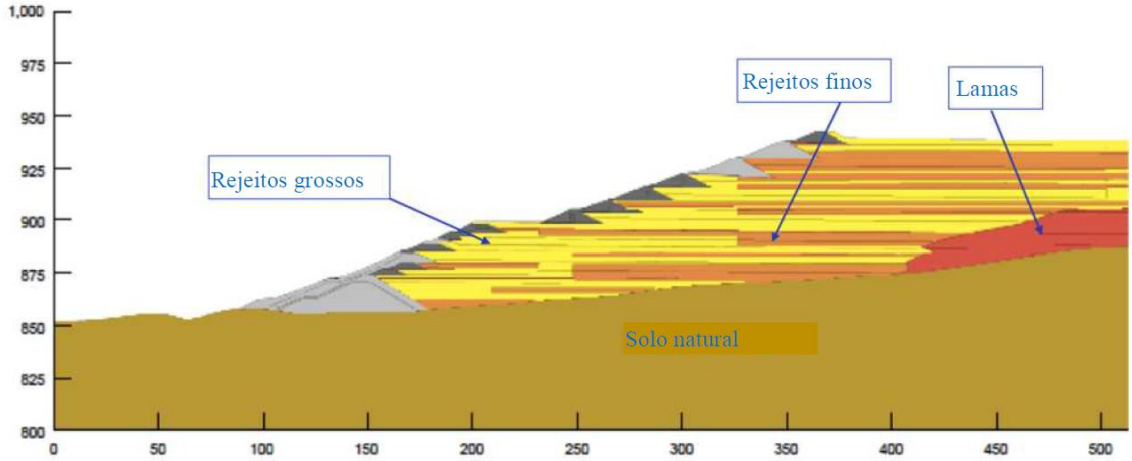
Fonte: Modificado de TUV SUD, 2018.

Figura 16 - Linha freática obtida para seção 4-4.



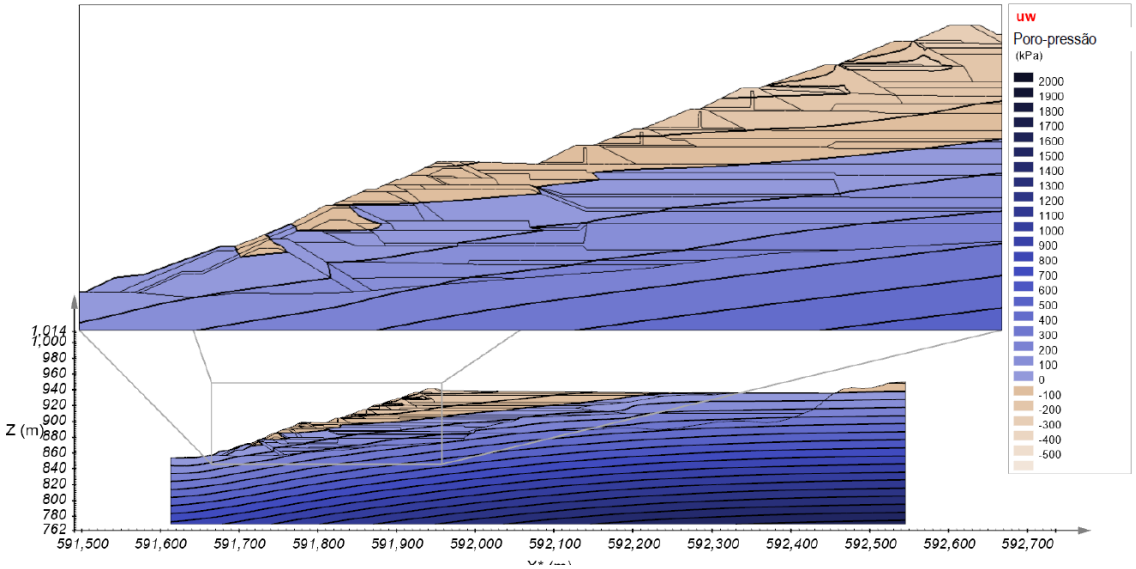
Fonte: TUV SUD, 2018.

Figura 17 - Seção 3-3 obtida pelo Painel de Especialistas.



Fonte: ROBERTSON *et al.*, 2019.

Figura 18 - Calibração para obtenção do nível d'água pelo Painel de Especialistas.



Fonte: ROBERTSON *et al.*, 2019.

3.1.4 - Parâmetros Geotécnicos

Desde a publicação da Resolução n° 13 da ANM (BRASIL, 2019), tornou-se obrigatória a elaboração de análises de estabilidade considerando a resistência não-drenada de pico para o rejeito em barragens alteadas pelo método de montante, exigindo Fator de Segurança mínimo de 1,30 para tais contextos. Posteriormente, a Resolução n° 95 estipulou critérios para definição de níveis de emergência (nível 1, 2 e 3) baseado em faixas de variação do Fator de Segurança obtido nas análises de estabilidade com resistência não-drenada de pico, sendo:

- 1,20 <= FS < 1,30 → Nível de Emergência 1
- 1,00 <= FS < 1,20 → Nível de Emergência 2
- FS < 1,00 → Nível de Emergência 3

Tendo em vista que a Barragem I da Mina do Córrego do Feijão é uma estrutura alteada pelo método de montante, e que as análises considerando o parâmetro de resistência não-drenada do rejeito são mais rigorosas, as análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas estudadas na presente dissertação serão fundamentadas neste mesmo conceito, com a utilização do parâmetro não-drenado de pico definido em TUV SUD (2018).

As análises de estabilidade foram realizadas para a condição não-drenada, que é considerada a condição mais crítica para esta estrutura, onde materiais saturados propensos à liquefação possuem resistência não-drenada (Su) e os demais materiais mantêm seus parâmetros de resistência drenada (c' e φ'). As análises não-drenadas combinam diferentes conceitos onde as resistências drenadas e não-drenadas são avaliadas simultaneamente.

De acordo com a TUV SUD (2018), os parâmetros geotécnicos para a condição drenada foram baseados na análise da documentação de projeto "As Built" existente, bem como nas avaliações de segurança realizadas nos últimos anos. Para a determinação da resistência não-drenada, apenas os rejeitos saturados foram considerados suscetíveis à liquefação, excluindo-se desta avaliação outros materiais existentes (aterros, fundações, etc.).

Para determinar a resistência não-drenada dos rejeitos (Su), foram interpretados os resultados de três tipos de ensaios geotécnicos: triaxiais (Não Adensado Não Drenado UU e Não Adensado Drenado CU), testes de palhetas e CPTu. A metodologia de análise dos resultados desses ensaios é apresentada na RPSB (TUV SUD, 2018) disponibilizada à população pelo Ministério Público Federal.

Os parâmetros geotécnicos médios obtidos pela TUV SUD (2018) para cada material constituinte da Barragem I podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade.

Material	γ nat (kN/m³)	c' (kPa)	ϕ‘ (graus)	s_u/σ'_{v0}	
				pico	residual
Solo Residual	20	16	30	-	-
Solo Compactado	19	10	30	-	-
Rejeito Compactado	28	0	37	-	-
Minério Ultrafino	25	0	30	-	-
Rejeito Saturado*	26	-	-	0,26	0,09
Rejeito	26	0	35	-	-

γ nat = Peso específico natural
c' (kPa) = Coesão
ϕ‘ = Ângulo de atrito
su/σ’v0 = Razão de resistência não-drenada
*= γ sat = Peso específico saturado

Fonte: Adaptado de TUV SUD, 2018.

Para abordagem probabilística, é fundamental conhecer certos conceitos de estatística, como a forma da distribuição de probabilidade, a média, o desvio padrão e a variância dos parâmetros geotécnicos. A média é representada pelos parâmetros definidos pela TUV SUD (2018), já o desvio padrão, como a Barragem I era uma estrutura cujo *start dam* foi na década de 70, com sucessivos alteamentos projetados e executados por diferentes empresas ao longo da sua vida útil, combinado com a de falta de informação a respeito da fundação e pela diferença mineralógica dos rejeitos que constituem grande parte dos alteamentos, optou-se por recorrer ao valores de coeficiente de variação (COV) existentes na literatura, considerando-se o limite máximo dos valores típicos apresentados por Duncan (2000) no Quadro 1 para cada variável, por conservadorismo. A variância então, foi obtida elevando-se o desvio padrão ao quadrado.

O resultado dos cálculos estatísticos supracitados está apresentado no Quadro 7. Desconsiderou-se a coesão para os materiais (rejeito, minério ultrafino, rejeito compactado) cujo valor considerado pela TUV SUD (2018) foi zero.

Quadro 7 - Estatística básica para os parâmetros geotécnicos.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	COV (%)	DESVIO PADRÃO (σ[Xi])	VARIÂNCIA (V[Xi])
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20	7	1,40	1,96
	c' (kPa)	16	80	12,80	163,84
	ϕ(graus)	30	13	3,90	15,21
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19	7	1,33	1,77
	c' (kPa)	10	80	8,00	64,00
	ϕ (graus)	30	13	3,90	15,21
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28	7	1,96	3,84
	ϕ (graus)	37	13	4,81	23,14
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25	7	1,75	3,06
	ϕ (graus)	30	13	3,90	15,21
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26	10	2,60	6,76
	Su|(σ'vo)	0,26	15	0,04	0,00
Rejeito	γnat (KN/m³)	26	7	1,82	3,31
	ϕ (graus)	35	13	4,55	20,70

Fonte: Autor.

Vale mencionar que os resultados obtidos para o desvio padrão utilizando valores típicos de COV (DUNCAN, 2010), ficaram próximos aos valores empregos por Braga (2019). O autor obteve um desvio padrão de 0,03 para a razão de resistência não drenada do rejeito saturado, 1,24 para o peso específico do rejeito saturado e 8,49 para coesão em solo compactado, tais números são compatíveis com os utilizados nesta pesquisa.

3.1.5 - Análise de Sensibilidade da Linha Freática

Nas últimas décadas, embora muitos pesquisadores tenham contribuído para a análise probabilística da estabilidade de taludes de barragens de terra (e.g. GUI *et al.*, 2000; BABU; SRIVASTAVA, 2010; CHO SE, 2013; KUMAR *et al.*, 2019; BRAGA, 2019), poucos estudos foram realizados para investigar os efeitos das flutuações do nível da água na estabilidade do talude da barragem de terra a partir de uma perspectiva probabilística. Fundamentando-se nisto, o objetivo principal desta pesquisa é incorporar a variação da linha freática e dos parâmetros geotécnicos que compõe a estrutura nas análises de estabilidade probabilísticas.

Para analisar as mudanças nos níveis freáticos no interior da barragem, o Painel de Especialistas agrupou os dados dos instrumentos (piezômetros e indicadores de nível d'água)

por local (ROBERTSON *et al.*, 2019). O agrupamento incluiu todos os piezômetros e indicadores de nível d'água localizados na barragem acima do recuo, no recuo e abaixo dele (Figura 19).

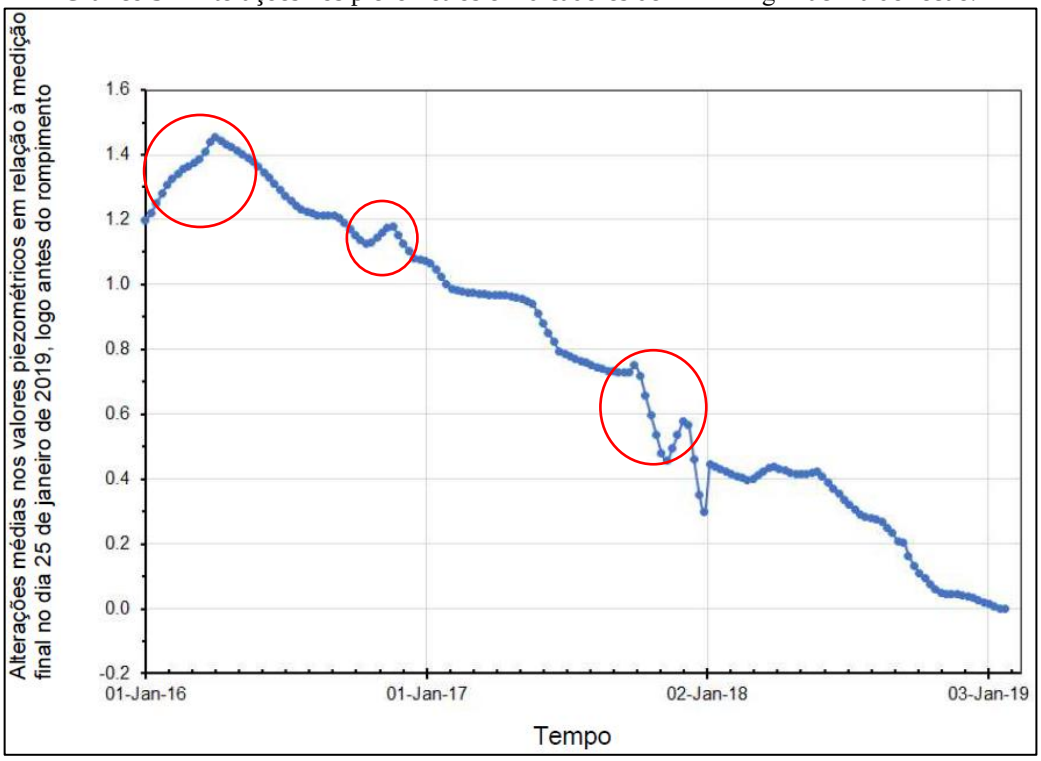
Figura 19 - Imagem aérea da Barragem I de agosto/2016, com destaque à berma do recuo ou retificação do eixo, entre os denominados alteamentos 3º e 4º.



Fonte: SETEC, 2019.

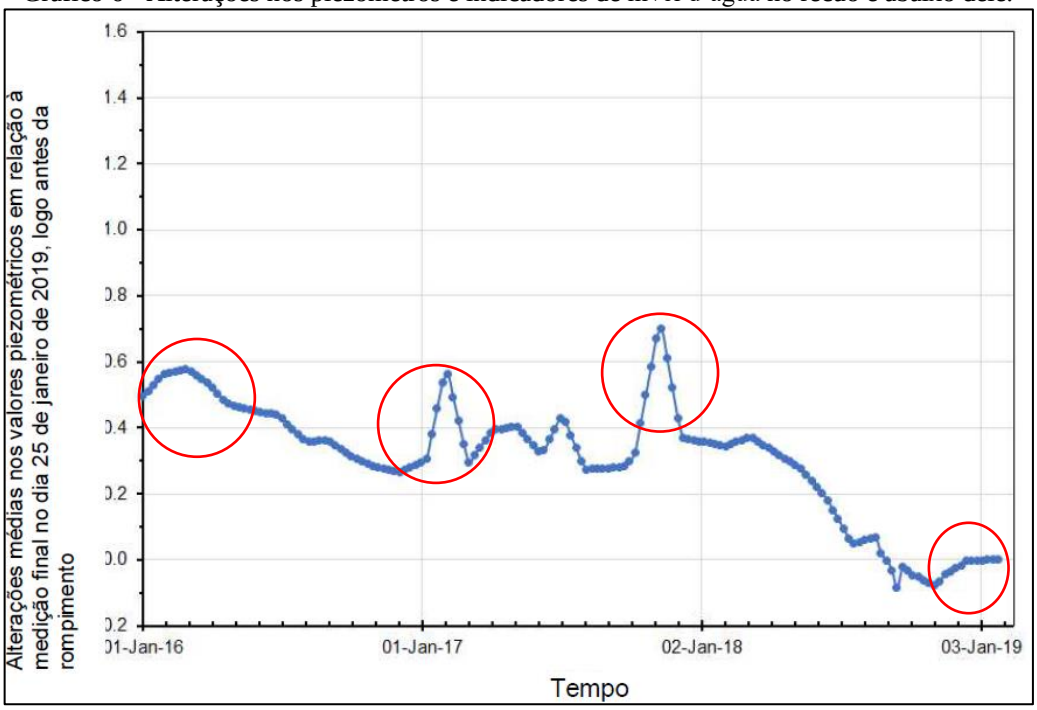
De acordo com o Painel de Especialistas, houve uma queda gradual no nível médio da superfície freática no interior do reservatório e maciços desde 2016, com picos durante o período chuvoso. A queda foi de aproximadamente 1,4m para os instrumentos acima do recuo e cerca de 0,5m para os instrumentos instalados no recuo ou abaixo dele, conforme evidenciado nos Gráficos 5 e 6. Esta observação foi atribuída ao lento rebaixamento de água após o fim da deposição de rejeitos em 2015. Ainda, é válido salientar que os picos demarcados nos Gráficos 5 e 6 seguem o padrão do período chuvoso característico da região, como pode ser visto no Gráfico 7, que representa o compilado de informações de quatro estações pluviométricas próximas a Barragem I nos 5 anos anteriores a ruptura.

Gráfico 5 - Alterações nos piezômetros e indicadores de nível d'água acima do recuo.



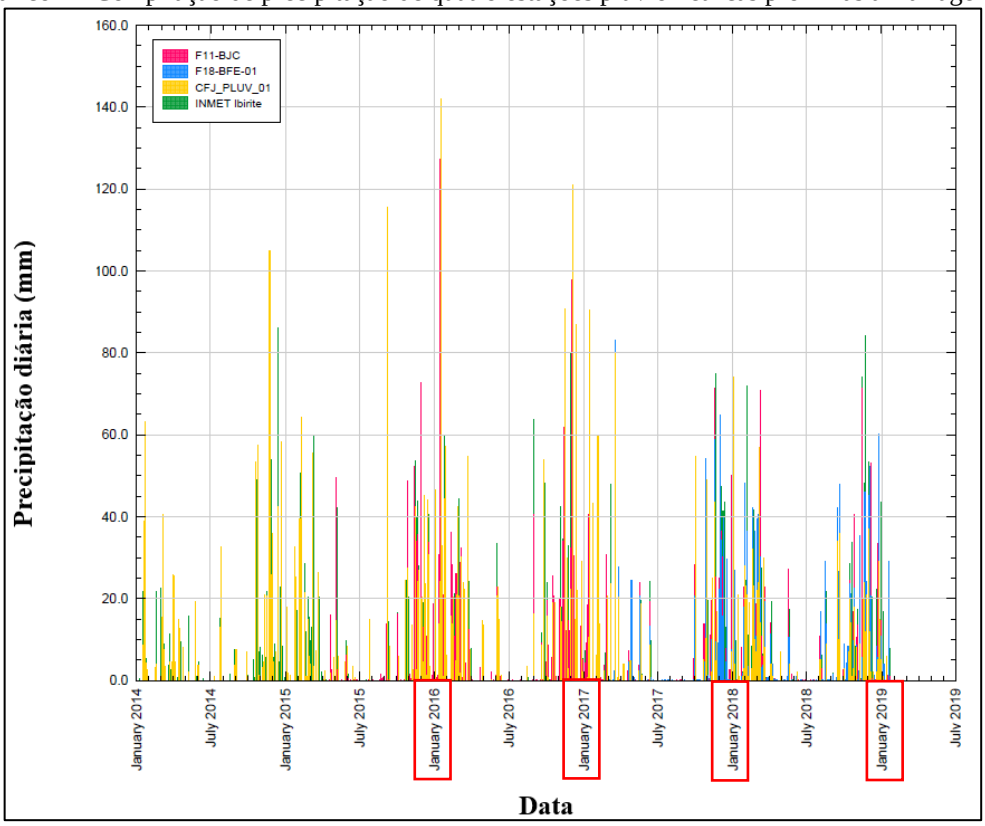
Fonte: Adaptado de ROBERTSON *et al.*, 2019.

Gráfico 6 - Alterações nos piezômetros e indicadores de nível d'água no recuo e abaixo dele.



Fonte: Adaptado de ROBERTSON *et al.*, 2019.

Gráfico 7 - Compilação de precipitação de quatro estações pluviométricas próximas a Barragem I.



Fonte: Adaptado de ROBERTSON *et al.*, 2019.

A sensibilidade da freática foi estabelecida com base na alteração máxima (1,4m e 0,5m) dos valores médios dos instrumentos indicados pelo Painel de Especialistas (ROBERTSON *et al.*, 2019), tendo a elevação da crista e do recuo como guias para analisar o comportamento da freática no interior da estrutura. Norteando-se nesta alteração e tendo a freática obtida pela TUV SUD (2018) como referência (REF), optou-se por projetar a segunda linha freática em uma posição superior (S-01) à linha freática de referência simulando um aumento no nível freático após uma possível chuva intensa (comum ao período do rompimento em 2019), somando-se 1,4m nas leituras dos instrumentos localizados acima do recuo e 0,5m nos que estão no recuo e abaixo dele. Além disso, foi considerada uma terceira freática em uma posição inferior (I-01) à referência, considerando a continuação da tendencia de queda de 1,4m nas leituras dos instrumentos localizados acima do recuo e 0,5m nos que estão no recuo e abaixo dele.

Uma outra freática foi analisada (I-02), a qual teve como objetivo verificar a elevação da freática no interior da barragem onde o valor do Fator de Segurança para uma estrutura sob condição não-drenada (1,3) seria alcançado, estando, por fim, em conformidade com a Resolução ANM nº 95 (BRASIL, 2022). A variação entre as freáticas no interior da estrutura é detalhada no Quadro 8 e pode ser observada nas Figuras 20 a 23.

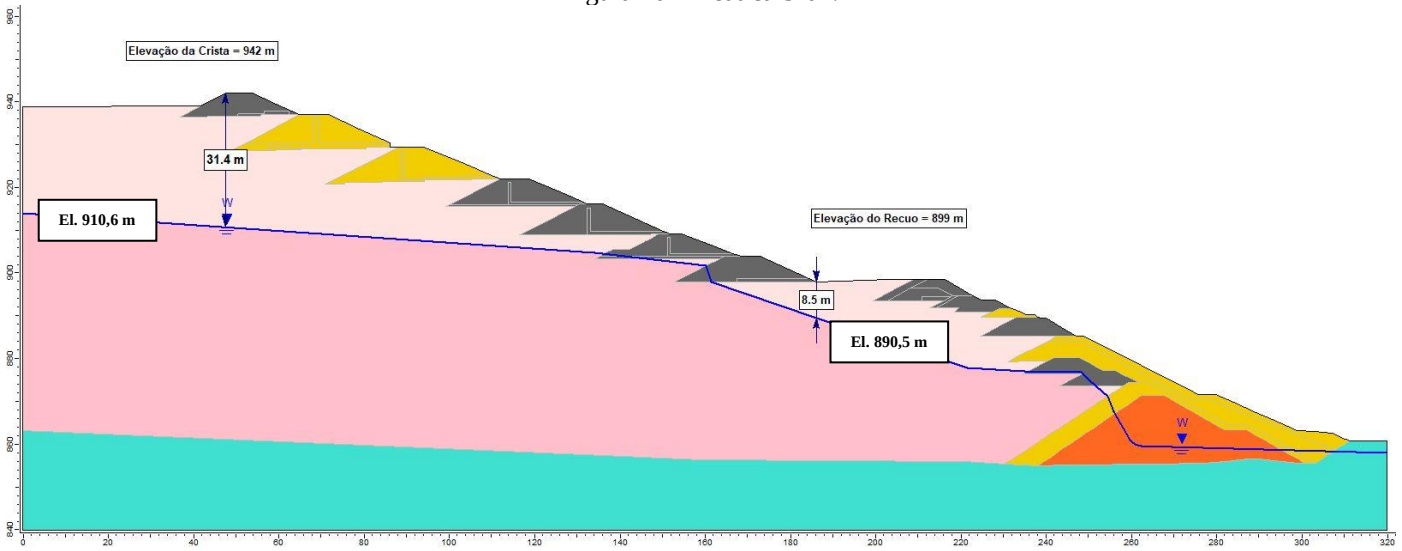
Quadro 8 - Posição das freáticas antes da sensibilidade para I-02.

FREÁTICA	ELEVAÇÃO DA CRISTA (m)	DISTÂNCIA ENTRE A CRISTA E A FREÁTICA (m)	ELEVAÇÃO DA FREÁTICA EM RELAÇÃO A CRISTA (m)	ELEVAÇÃO DO RECUO (m)	DISTÂNCIA ENTRE O RECUOE A FREÁTICA (m)	ELEVAÇÃO DA FREÁTICA EM RELAÇÃO AO RECUO (m)
S-01	942,0	31,4	910,6	899,0	8,5	890,5
REF*		32,8	909,2		9,0	890,0
I-01		34,2	907,8		9,5	889,5
I-02[1]		A determinar	A determinar		A determinar	A determinar
I-02[2]		A determinar	A determinar		A determinar	A determinar

*REF = Freática Instrumentada de Referência
[1] = Freática FS ≥ 1,3 com superfície de Ruptura Circular
[2] = Freática FS ≥ 1,3 com superfície de Ruptura Não-Circular

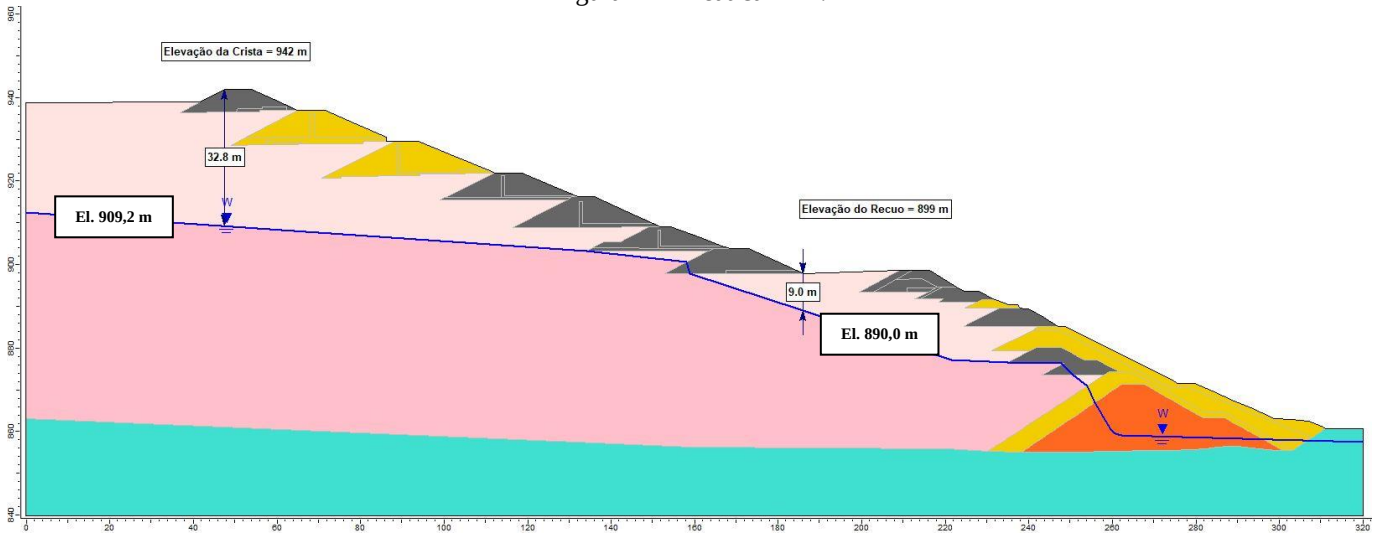
Fonte: Autor.

Figura 20 - Freática S-01.



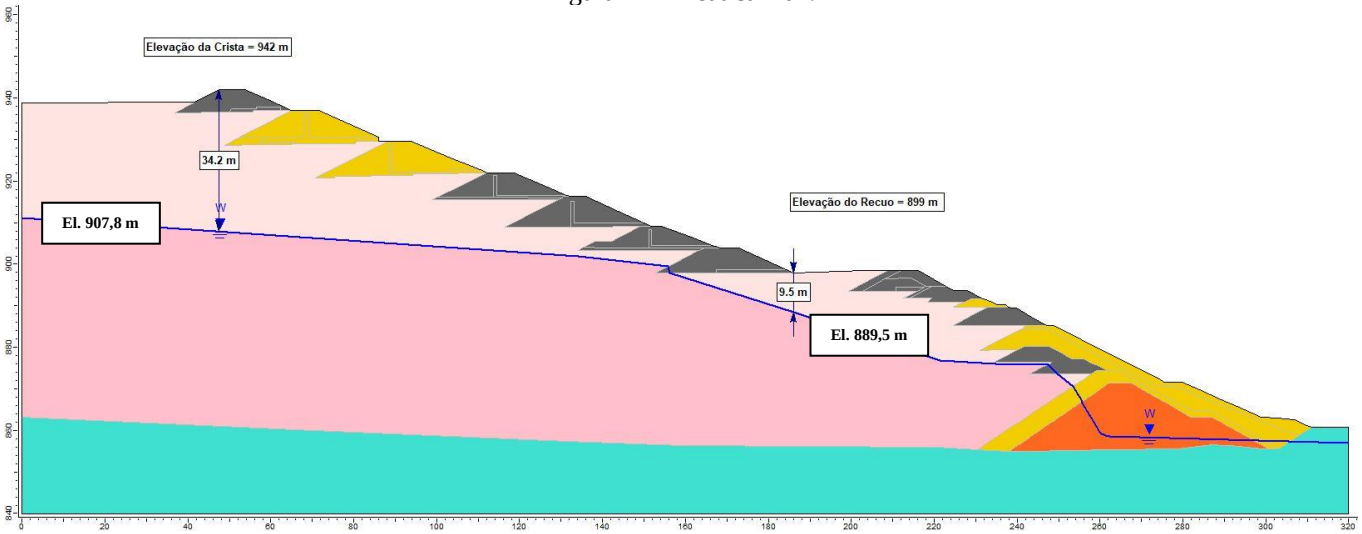
Fonte: Autor.

Figura 21 - Freática REF.



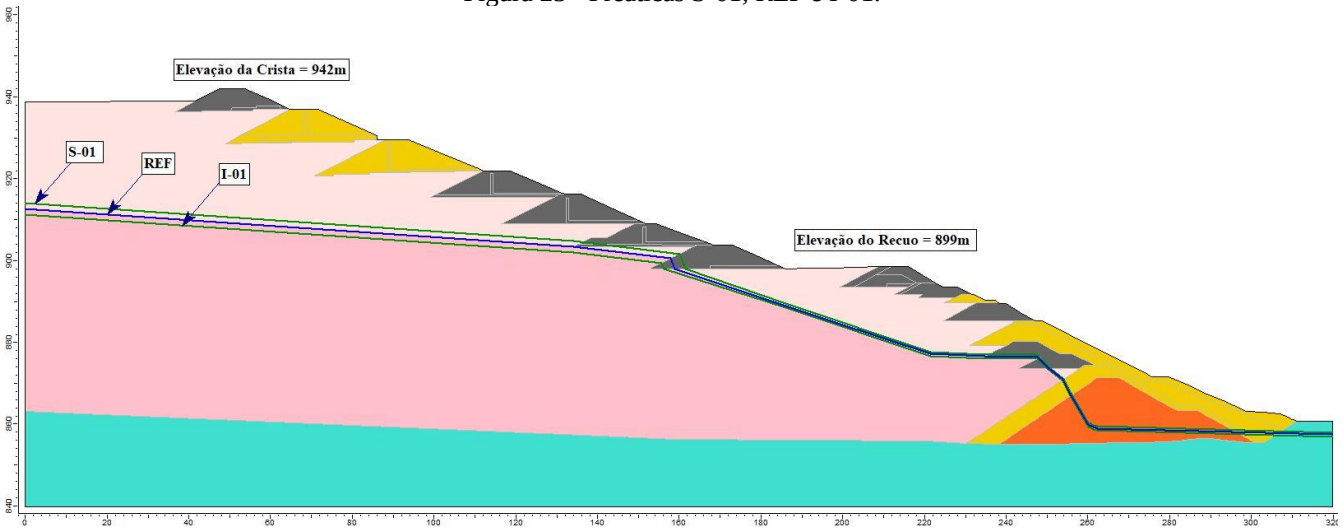
Fonte: Autor.

Figura 22 - Freática I-01.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Freáticas S-01, REF e I-01.



Fonte: Autor.

3.2 - Análise de Estabilidade Determinística

Para desenvolver uma análise probabilística, primeiro é necessário realizar a determinística. Um dos dados de entrada indispensáveis para realizar as análises é a geometria da estrutura (Seção Tipo), conforme já apresentado no item 1.1.3 deste trabalho. Os cálculos de estabilidade requerem dados relacionados aos parâmetros do solo, listados no Quadro 6 do item 3.1.5 anteriormente apresentado.

Os Fatores de Segurança mínimos obtidos para cada posição do lençol freático foram calculados pela análise de estabilidade determinística. Os métodos de Equilíbrio Limite utilizados foram: Morgenstern-Price e Spencer para o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, considerando as superfícies de ruptura circular, seguindo o critério utilizado pela TUV SUD (2018). Em razão da baixa resistência, da variabilidade do material constituinte da Barragem I, bem como da má disposição do rejeito ao longo dos anos, fazendo com que não houvesse uma segregação hidráulica adequada e bem distribuída no interior do reservatório (ROBERTSON *et al.*, 2019), optou-se por conduzir as análises de estabilidade considerando também a superfície de ruptura não circular, otimizada, utilizando o software SLIDE 2D, versão 9.0 da empresa ROCSCIENCE ®.

3.3 - Análise de Estabilidade Probabilística

A análise probabilística foi realizada como complemento à análise do Fator de Segurança obtido de forma determinística. Os métodos utilizados foram: FOSM e MC.

3.3.1 - FOSM

Por calcular a Probabilidade de Ruptura e o Índice de Confiabilidade, além de permitir uma verificação de quais parâmetros mais influenciam a segurança da estrutura, o método FOSM tem sido recomendado por vários autores em aplicações geotécnicas (CHRISTIAN *et al.*, 1992; SAYÃO *et al.*, 2012). Além da proporcionar uma maior assertividade e eficácia em uma tomada de decisão em relação a segurança de qualquer estrutura geotécnica, outra

vantagem de se obter as variáveis aleatórias que mais contribuem para a variância do Fator de Segurança permite rejeitar as variáveis de menor importância no cálculo probabilístico pelo método MC.

De acordo com Baecher e Christian (2003), o método FOSM é simples e pode ser dividido, resumidamente, nas seguintes etapas, detalhadas no item 2.5.2.2. desta dissertação:

i. Identificação dos parâmetros variáveis e que afetam o resultado do Fator de Segurança;
ii. Obtenção dos dados estatísticos, como por exemplo a média, a variância e, caso exista, o coeficiente de correlação das variáveis em estudo;
iii. Cálculo do Fator de Segurança a partir do valor médio dos parâmetros de interesse, utilizando as análises determinísticas;
iv. Cálculo das derivadas parciais da função de cada variável;
v. Obtenção da influência de cada variável no Fator de Segurança;
vi. Cálculo da variância do Fator de Segurança, do Índice de Confiabilidade e da Probabilidade de Ruptura por meio da aplicação dos dados estatísticos à distribuição adequada ao problema;
vii. Análise dos resultados e da contribuição dos parâmetros de interesse no Fator de Segurança.

O método FOSM exige que uma análise de estabilidade seja executada modificando cada parâmetro variável (x), um a um, mantendo as demais variáveis mantidas fixas.

Dell'Avanzi (1995) indica que a variação do parâmetro seja pequena o suficiente para que a razão entre a derivada do FS e a derivada da variável aleatória seja considerada constante. Isto é, independentemente do resultado da derivada do valor médio da amostra. O autor concluiu que para variações dos parâmetros em torno de ±10% de seu valor médio, esta condição é atendida. Nesta pesquisa, as análises probabilísticas pelo método FOSM foram feitas com variações de -10% sobre o valor médio de cada parâmetro considerado variável.

Os Quadros 9 a 11 mostram o cálculo feito para a freática S-01 (Superfície de ruptura não circular); o procedimento se repetiu para as demais (Apêndice I). Portanto, o número de iterações é igual a n + 1 análises de Equilíbrio Limite, para obter V[x], onde n é o número de variáveis aleatórias. Na análise determinística inicial, todas as variáveis são consideradas com seu valor médio.

Quadro 9 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 1.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA					
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO		
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
FS – MORGENSTERN-PRICE	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**1,000**	**0,992**	**0,998**	**0,994**
FS - SPENCER	**1,006**	**1,006**	**1,006**	**1,006**	**1,000**	**1,005**	**1,000**

Fonte: Autor.

Quadro 10 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 2.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA			
	PARÂMETRO MÉDIO	REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO	
		γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,000**	**0,998**	**1,000**	**1,005**	**0,997**
FS - SPENCER	**1,006**	**1,002**	**1,006**	**1,006**	**1,004**

Fonte: Autor.

Quadro 11 - Análise feita para freática identificada como S-01 modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas – Parte 3.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA			
	PARÂMETRO MÉDIO	REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,000**	**0,990**	**0,917**	**0,994**	**0,992**
FS - SPENCER	**1,006**	**0,995**	**0,922**	**1,001**	**0,998**

Fonte: Autor.

Perante os resultados mostrados nos Quadros 9, 10 e 11, bem como os dados estatísticos obtidos, o próximo objetivo do método FOSM consiste em obter a variância de FS por meio da Equação 14. Através da variância do FS foi possível encontrar o Índice de Confiabilidade utilizando a Equação 6 e a Probabilidade de Ruptura, com auxílio do Excel, por meio do comando representado pela Equação 16. O procedimento foi realizado 15 vezes, considerando a quantidade de freáticas e as condições em análise nesta pesquisa, resultando em 240 análises de Equilíbrio Limite.

$$PR = \text{DIST. NORM. N}(1; \text{FS determinístico}; \sigma(\text{FS}); \text{VERDADEIRO}) \quad [16]$$

3.3.2 - Monte Carlo

Para aplicação do método de Monte Carlo é necessário conhecer a média, o desvio padrão (σxi) e os valores máximo e mínimo relativos de cada variável, bem como a distribuição estatística dos dados. Em uma distribuição normal, três desvios padrão da média cobrem 99,7% de todas as amostras, fornecendo uma distribuição normal bem definida (SILVA, 2015), logo, optou-se por multiplicar o desvio padrão por três para obter o máximo e mínimo relativo.

Considerou-se um nível de confiança de 90,00% e as duas variáveis que mais influenciaram na variância do Fator de Segurança obtido pelo método FOSM, portanto, pela Equação 8, o número de simulações (N) foi de 4522.

De acordo com Flores (2008), vários conjuntos de valores de n variáveis aleatórias de entrada (parâmetros geotécnicos médios) X = (X1, X2, ..., Xn), devem ser gerados aleatoriamente, usando geradores de números aleatórios que produzem a função de densidade de probabilidade selecionada. Cada conjunto gerado aleatoriamente deve ser empregado para calcular uma realização do fator de segurança FS(X). O conjunto das realizações de FS(X) são então utilizadas para definir a função de densidade de probabilidade de FS (X).

As simulações foram realizadas com o software Slide 2D, versão 9.0 da empresa ROCSCIENCE ®. Optou-se por executar as análises através do método *Overall Slope*, que consiste em encontrar uma superfície de ruptura potencial com menor valor do Fator de Segurança para cada iteração analisada. Sendo que diferentes valores das variáveis aleatórias são considerados em cada iteração realizada. Segundo Meza López (2017) esta seria a forma de análise mais apropriada, considerando que diferentes parâmetros de resistência podem resultar em localizações de superfícies de ruptura distintas, embora isso represente um tempo computacional excessivo. A título de conhecimento, cada análise durou cerca de 24 horas.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das análises realizadas são apresentados no decorrer deste tópico.

Através das análises determinísticas, foi obtido o Fator de Segurança para cada posição da linha freática no interior da estrutura e pelas análises probabilísticas foi obtido o Índice de Confiabilidade e a Probabilidade de Ruptura para cada situação analisada.

4.1 - Análise de Estabilidade Determinística

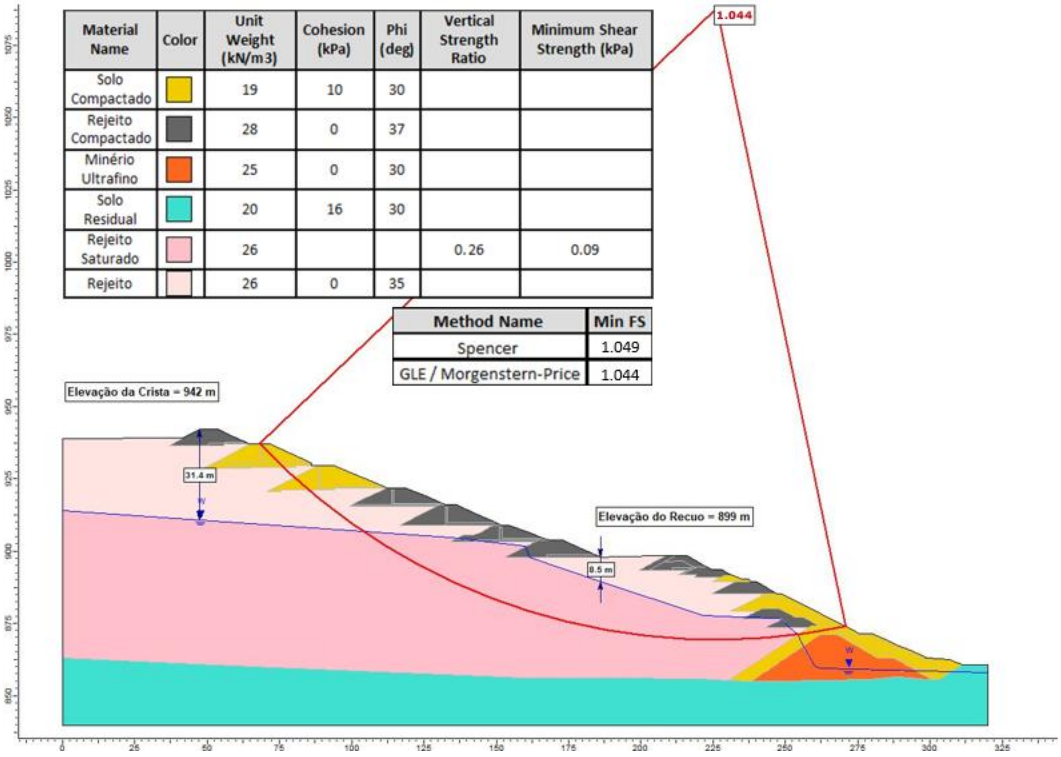
Para as freáticas identificadas como S-01, REF e I-01, os dois métodos de Equilíbrio Limite forneceram resultados de Fator de Segurança menores do que o mínimo exigido pela Resolução ANM nº 95 (BRASIL, 2022) para que uma estrutura como a analisada não se enquadre em nenhum nível de emergência, quando o valor de FS apresenta-se menor que 1,3. Considerando-se os resultados obtidos, a estrutura se enquadraria em nível de emergência 2. Os valores de FS obtidos por meio da análise de estabilidade determinística são apresentados no Quadro 12. As Figuras 24 a 31 mostram, para cada freática, as superfícies de ruptura para o método de Equilíbrio Limite cujo valor de FS foi menor.

Quadro 12 - Fatores de Segurança determinístico para as freáticas S-01, REF e I-01.

FREÁTICA	SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR		SUPERFÍCIE CIRCULAR	
	FS - EQUILIBRIO LIMITE		FS - EQUILIBRIO LIMITE	
	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
S-01	1,000	1,006	1,044	1,049
REF	1,022	1,025	1,065	1,068
I-01	1,045	1,046	1,087	1,089

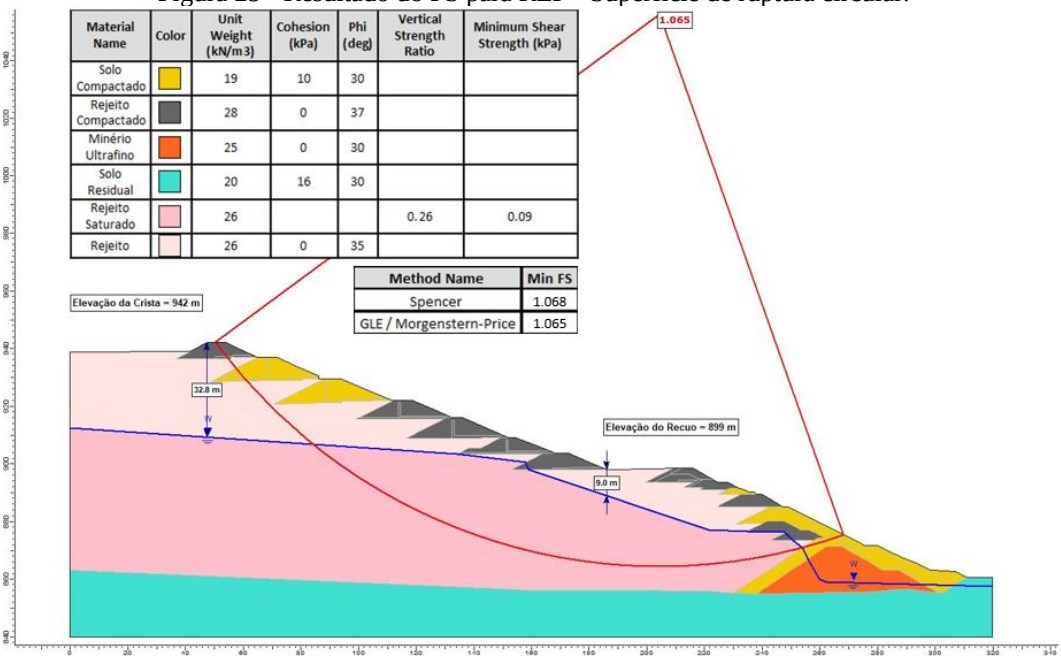
Fonte: Autor.

Figura 24 - Resultado do FS para S-01 - Superfície de ruptura circular.



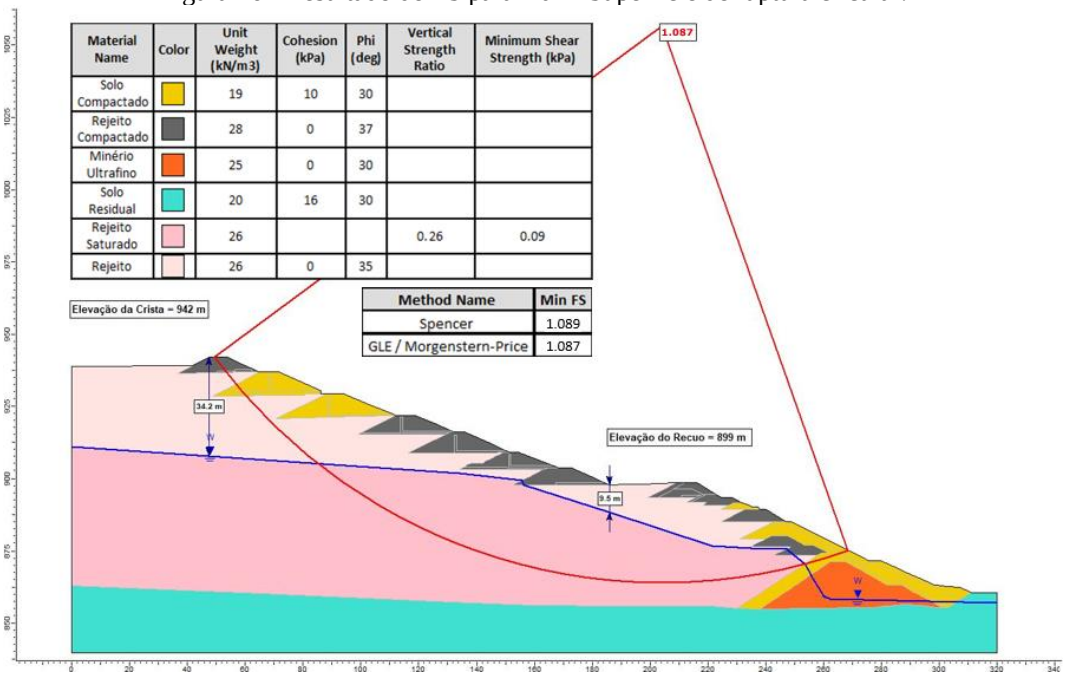
Fonte: Autor.

Figura 25 - Resultado do FS para REF - Superfície de ruptura circular.



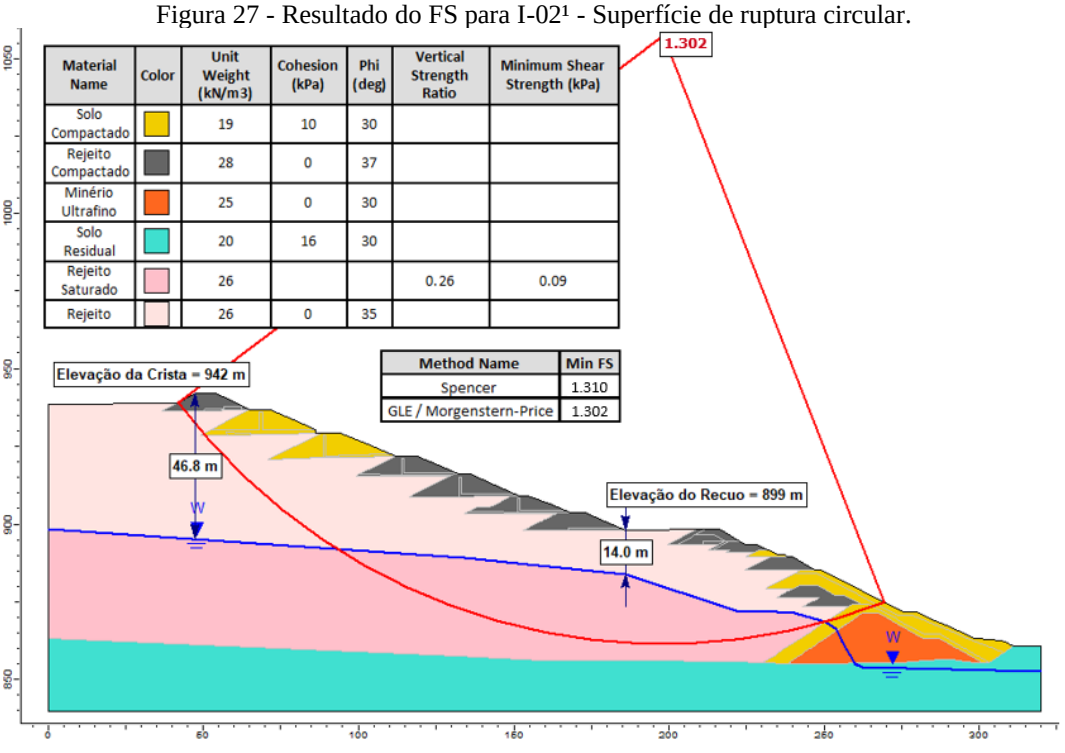
Fonte: Autor.

Figura 26 - Resultado do FS para I-01 - Superfície de ruptura circular.



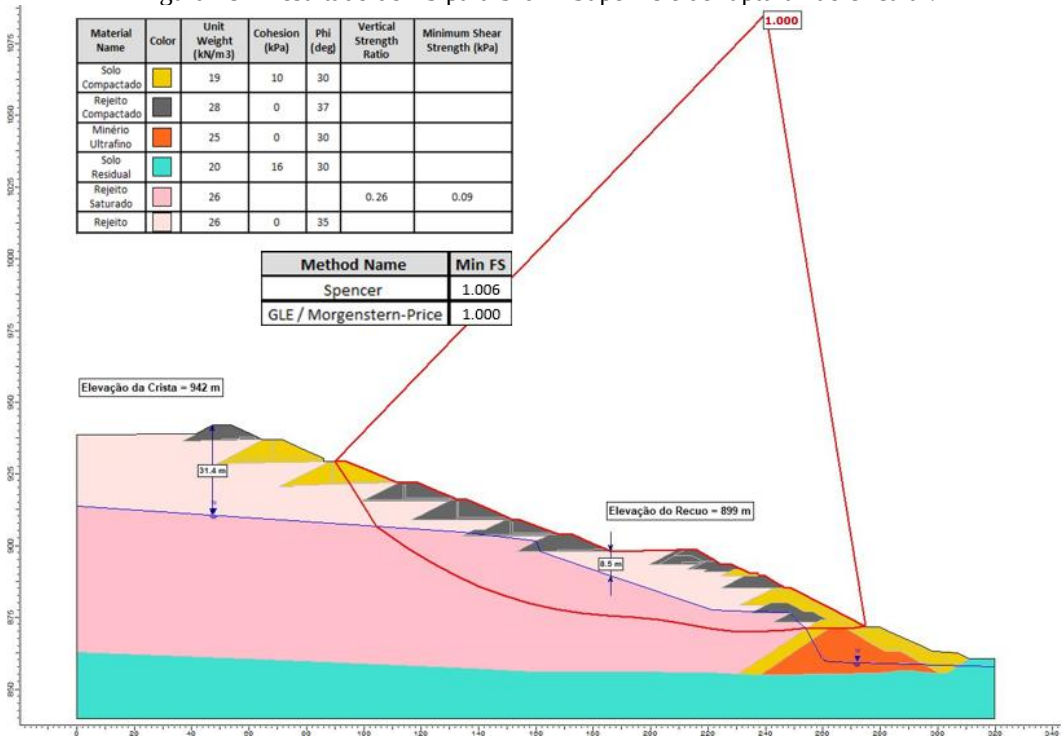
Fonte: Autor.

Figura 27 - Resultado do FS para I-02[1] - Superfície de ruptura circular.



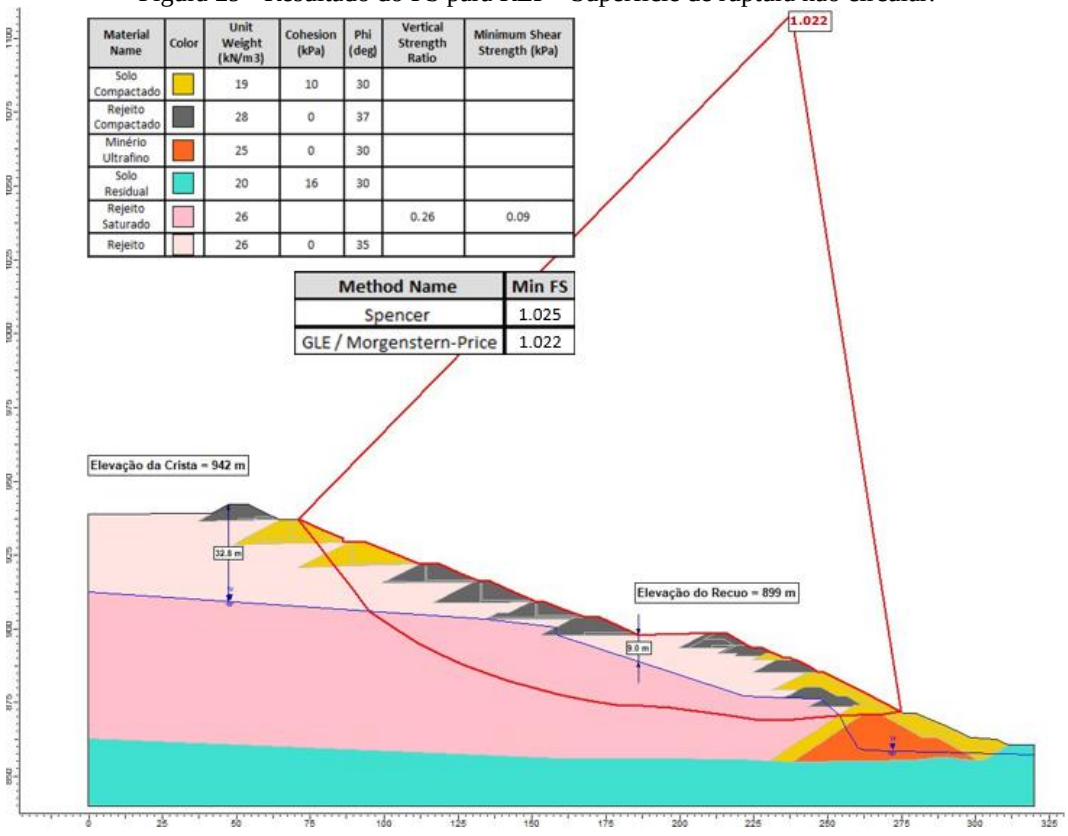
Fonte: Autor.

Figura 28 - Resultado do FS para S-01 - Superfície de ruptura não circular.



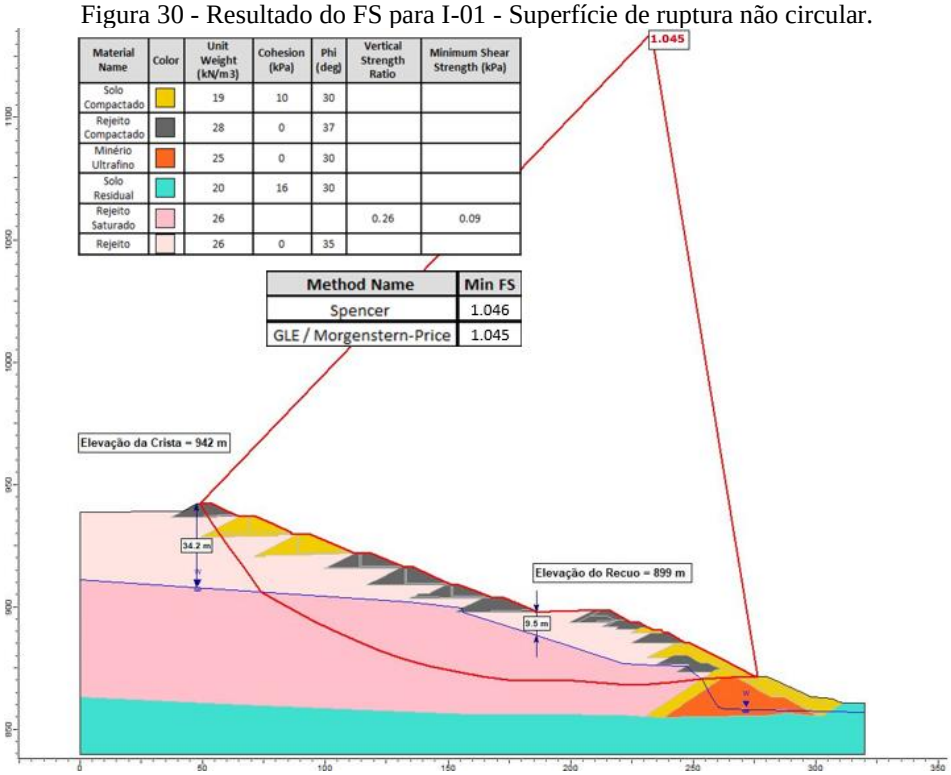
Fonte: Autor.

Figura 29 - Resultado do FS para REF - Superfície de ruptura não circular.



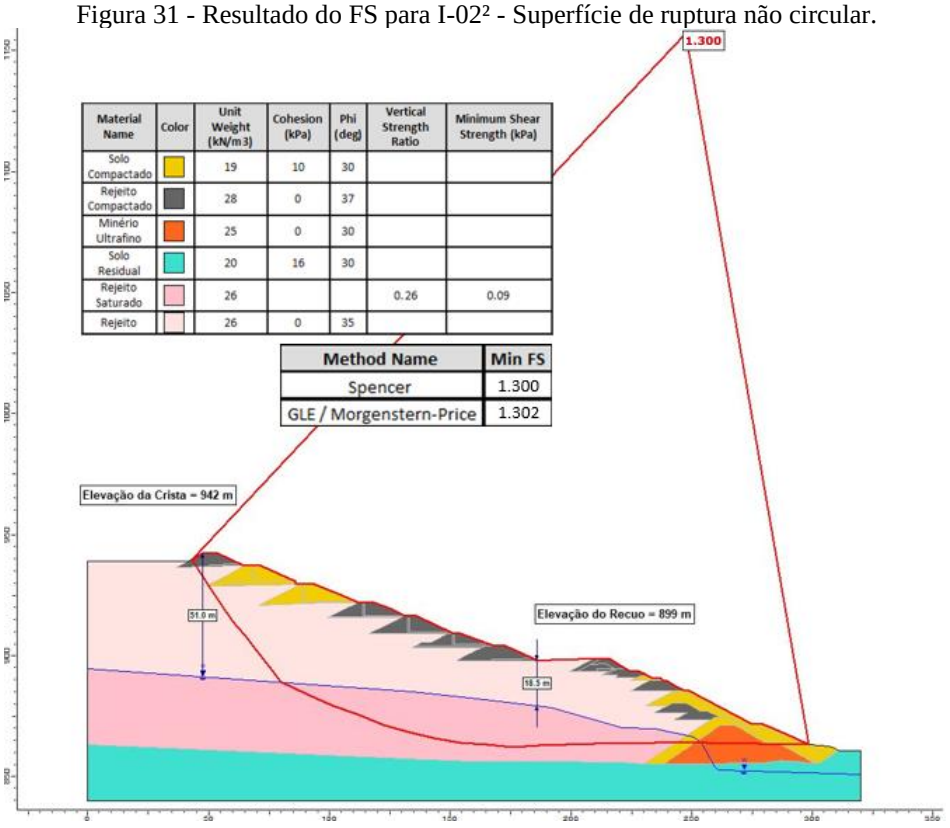
Fonte: Autor.

Figura 30 - Resultado do FS para I-01 - Superfície de ruptura não circular.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Resultado do FS para I-02[2] - Superfície de ruptura não circular.



Fonte: Autor.

Nota-se que, independentemente do método de Equilíbrio Limite analisado, os valores de FS são inferiores para uma superfície de ruptura não circular quando comparado a circular. Segundo Gerscovich (2016), a superfície de ruptura tende a ser circular em solos relativamente homogêneos, podendo ter uma aparência mais achatada na ocorrência de uma anisotropia mais significativa em relação a resistência. Já as superfícies planares ou translacionais se caracterizam pelas descontinuidades ou planos de fraquezas. E, por fim, as rupturas de forma mista ocorrem quando há uma heterogeneidade, caracterizada pela presença de materiais ou descontinuidades com resistências mais baixas. Como neste estudo a estrutura é composta por materiais diferentes (rejeito, solo e minério ultrafino) e, predominantemente, de baixa resistência, a hipótese de superfície não circular de ruptura é a mais realista no cálculo do FS.

O resultado encontrado para a freática S-01 para superfície de ruptura não circular, cujo valor de FS para o método de Mongenstern-Price foi de 1,000, mostra que a estrutura se encontrava em Equilíbrio Limite, logo, entre as freáticas analisadas, esta posição é a mais crítica. Ao comparar as superfícies de ruptura para essa freática (Figuras 24 e 28), nota-se uma diferença no início da cunha, sendo na crista do 8° alteamento para não circular e na crista do 9° para a circular. Apesar de semelhantes em termos de profundidade, o FS obtido com a superfície circular foi 4,4% maior, superestimando a real segurança.

Para a freática I-02, cujo intuito foi verificar em qual elevação estaria o nível d’água onde o FS fosse maior ou igual 1,3. De acordo com o Quadro 13, considerando-se a superfície de ruptura não circular o valor exigido por Lei seria alcançado quando a freática estivesse verticalmente a 51,0 metros da crista e 15,5 metros do recuo. Já para ruptura circular o FS mínimo seria alcançado quando o nível d’água estivesse a 46,8 metros da crista e a 14,0 metros do recuo. Tal análise foi realizada levando-se em conta a tendência de queda da leitura dos instrumentos mencionada pelo Painel dos Especialistas e apresentada no tópico 3.1.5 desta dissertação.

Quadro 13 - Fator de Segurança determinístico para freática I-02.

FREÁTICA	SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR		SUPERFÍCIE CIRCULAR	
	FS - EQUILIBRIO LIMITE		FS - EQUILIBRIO LIMITE	
	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
I-02	1,302	1,300	1,302	1,310
	ELEVAÇÃO			
	ELEVAÇÃO (C - CF)**	ELEVAÇÃO (R - CF)***	ELEVAÇÃO (C - CF)**	ELEVAÇÃO (R - CF)***
	942 - 51,0 m	899 - 15,5 m	942 - 46,8 m	899 - 14,0 m
** (C - CF) = (Cota da Crista - Cota da Freática) *** (R - CF) = (Cota do Recuo - Cota da Freática)				

Fonte: Autor.

A elevação da freática para a superfície circular (I-02¹) e não circular (I-02²) é representada nas Figuras 32 e 33. O Quadro 14 e a Figura 34 representam a descrição completa de todas as freáticas analisadas após a análise de sensibilidade para definição da freática I-02.

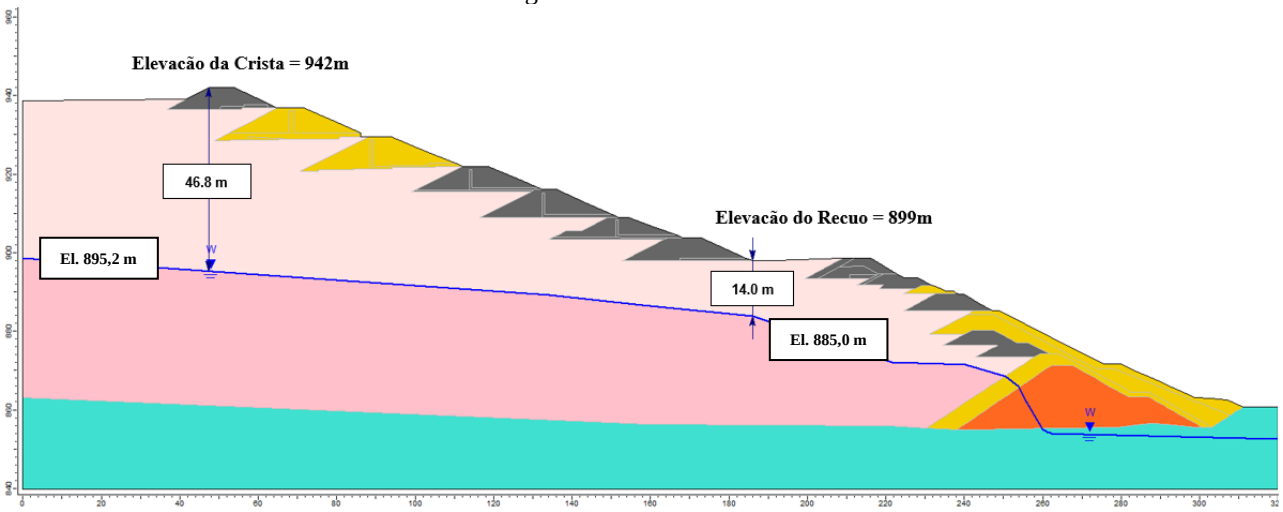
Quadro 14 - Posição das freáticas após a sensibilidade para I-02.

FREÁTICA	ELEVAÇÃO DA CRISTA (m)	DISTÂNCIA ENTRE A CRISTA E A FREÁTICA (m)	ELEVAÇÃO DA FREÁTICA EM RELAÇÃO A CRISTA (m)	ELEVAÇÃO DO RECUO (m)	DISTÂNCIA ENTRE O RECUOE A FREÁTICA (m)	ELEVAÇÃO DA FREÁTICA EM RELAÇÃO AO RECUO (m)
S-01	942,0	31,4	910,6	899,0	8,5	890,5
REF*		32,8	909,2		9,0	890,0
I-01		34,2	907,8		9,5	889,5
I-02[1]		46,8	895,2		14,0	885,0
I-02[2]		51,0	891,0		15,5	883,5

*REF = Freática Instrumentada de Referência
[1] = Freática FS ≥ 1,3 com superfície de Ruptura Circular
[2] = Freática FS ≥ 1,3 com superfície de Ruptura Não-Circular

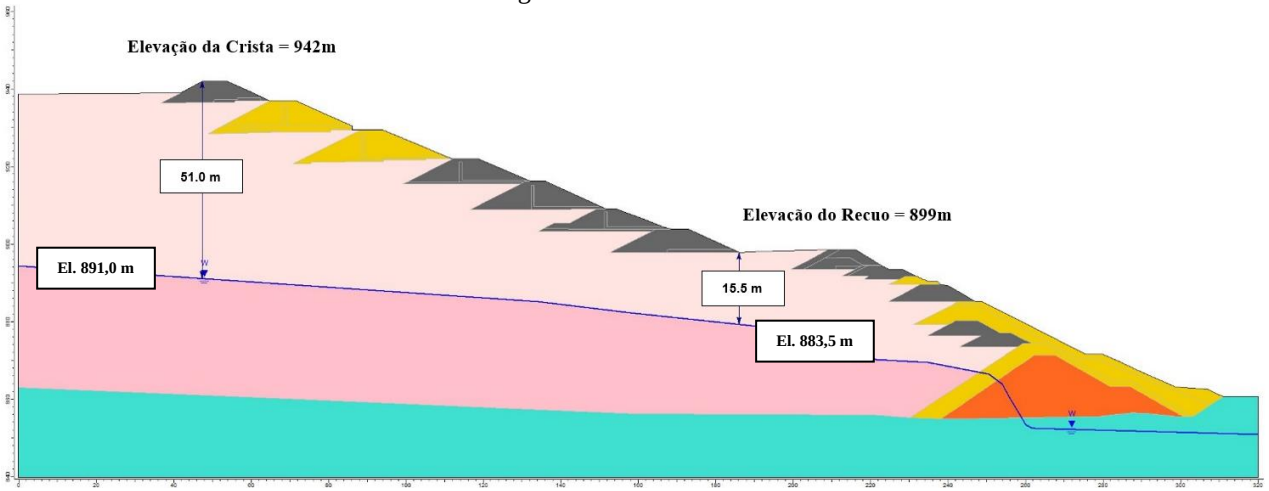
Fonte: Autor.

Figura 32 - Freática I-02[1].



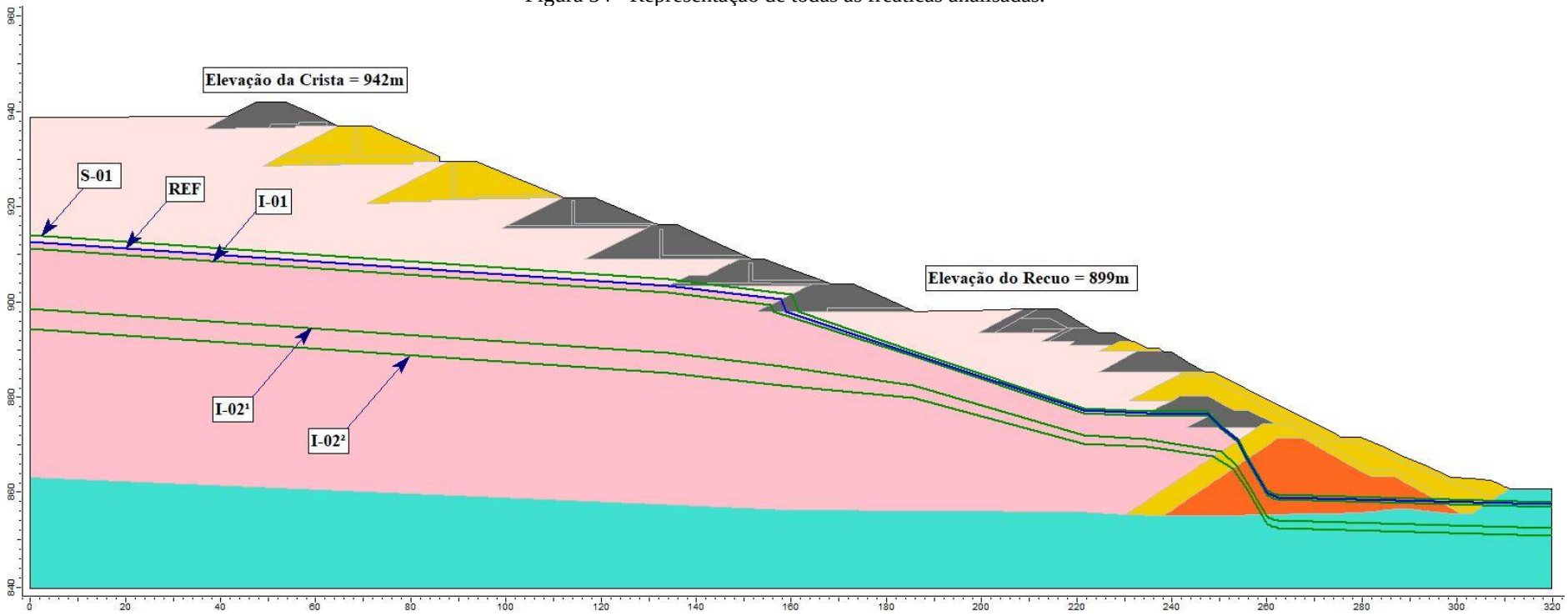
Fonte: Autor.

Figura 33 - Freática I-02[2].



Fonte: Autor.

Figura 34 - Representação de todas as freáticas analisadas.



Fonte: Autor.

Conforme apresentado no Quadro 15, o Fator de Segurança calculado para a freática S-01, foi de 1,049, próximo aos valores observados por D'Hyppolito (2023), Braga (2019) e pela TUV SUD (2018), aplicando o mesmo método de Equilíbrio Limite e a superfície de ruptura circular. A diferença pode estar relacionada com o desenho da geometria da barragem, a definição dos parâmetros geotécnicos médios e da linha freática. Contudo, todos os valores convergem para um Fator de Segurança próximo à instabilidade, FS < 1.

Quadro 15 - Comparação entre FS com outros trabalhos (Spencer e ruptura circular)

FREÁTICA	SUPERFÍCIE CIRCULAR
	FS - EQUILIBRIO LIMITE
	SPENCER
S-01	1,049
TUV SUD (2018)	1,090
Braga (2019)	1,052
D'Hippolito (2023)	1,030

Fonte: Autor.

4.2 - Análise de Estabilidade Probabilística

As análises probabilísticas foram realizadas considerando os métodos FOSM e Monte Carlo e os resultados obtidos são discutidos nos itens a seguir.

4.2.1 - FOSM

4.2.1.1 - Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade

O Quadro 16 representa a sequência de cálculo para obtenção da variância do FS, consequentemente da PR e β, especificamente para a freática S-01, considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular (o cálculo para as demais freáticas pode ser visto no Apêndice I).

Quadro 16 - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática S-01 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MEDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,000	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,000	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,000	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	0,992	0,008	-0,004	3,14E-05	0,19
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	0,998	0,002	-0,002	2,56E-04	1,59
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	0,994	0,006	-0,002	6,08E-05	0,38
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	0,998	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,000	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,005	-0,005	0,002	1,22E-05	0,08
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	0,997	0,003	-0,001	1,52E-05	0,09
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	0,990	0,010	-0,004	1,00E-04	0,62
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,917	0,083	-3,192	1,55E-02	96,14
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	0,994	0,006	-0,002	3,60E-05	0,22
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	0,992	0,008	-0,002	1,08E-04	0,67

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).

δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).

V[Xi] = Variância da média das variáveis.

V[FS] = Variância total do FS.

σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.

β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.

V[FS]	0,016	100,00
σ(FS)	0,127	
MÉTODO	MORGENSTERN-PRICE	
FS Determinístico	1,000	
β	0,000	
PR	0,500000	1/2,00

Fonte: Autor.

Os valores de PR (em % e fração) e β obtidos pelo método FOSM para cada posição da freática considerando as superfícies de ruptura circular e não circular estão resumidos nos Quadros 17 e 18, respectivamente.

Quadro 17 - Valores de PR e β para superfície de ruptura circular.

FREÁTICA	PR				β	
	MORGENSTERN-PRICE		SPENCER		MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
S-01	37,13%	1/2,70	35,91%	1/2,78	0,328	0,361
REF	31,45%	1/3,18	30,18%	1/3,31	0,483	0,519
I-01	26,22%	1/3,81	24,87%	1/4,02	0,636	0,679
I-02¹	2,93%	1/34,13	3,05%	1/32,79	1,891	1,873

Fonte: Autor.

Quadro 18 - Valores de PR e β para superfície de ruptura não circular.

FREÁTICA	PR				β	
	MORGENSTERN-PRICE		SPENCER		MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
S-01	50,00%	1/2,00	48,13%	1/2,08	0,000	0,047
REF	43,31%	1/2,31	42,39%	1/2,36	0,168	0,192
I-01	36,80%	1/2,72	36,96%	1/2,70	0,337	0,333
I-02²	2,04%	1/49,02	1,92%	1/58,14	2,045	2,115

Fonte: Autor.

Conforme o resultado apresentado nos Quadros 17 e 18, em todas as posições de freáticas, os valores de PR e os de β obtidos se encontram abaixo dos valores típicos para barragens indicados por Dell' Avanzi e Sayão (1998) e apresentados na Tabela 2 desta dissertação. É importante ressaltar o resultado obtido para I-02 (¹ e ²), mesmo atingindo um Fator de Segurança maior do que o preconizado pela Resolução n° 95 da ANM para que a estrutura não entrasse em nível de emergência, a Probabilidade de Ruptura é alta para uma barragem. Ressalta-se que o valor de PR para a I-02¹ foi maior quando comparado a I-02², tal fato pode ser explicado pela elevação da freática I-02¹, a qual é superior a I-02², logo, apresenta uma maior quantidade de rejeito saturado, aumentando, portanto, a PR.

Observa-se que, independentemente da superfície de ruptura analisada, o Índice de Confiabilidade aumenta consideravelmente à medida em que a linha freática se afasta da crista

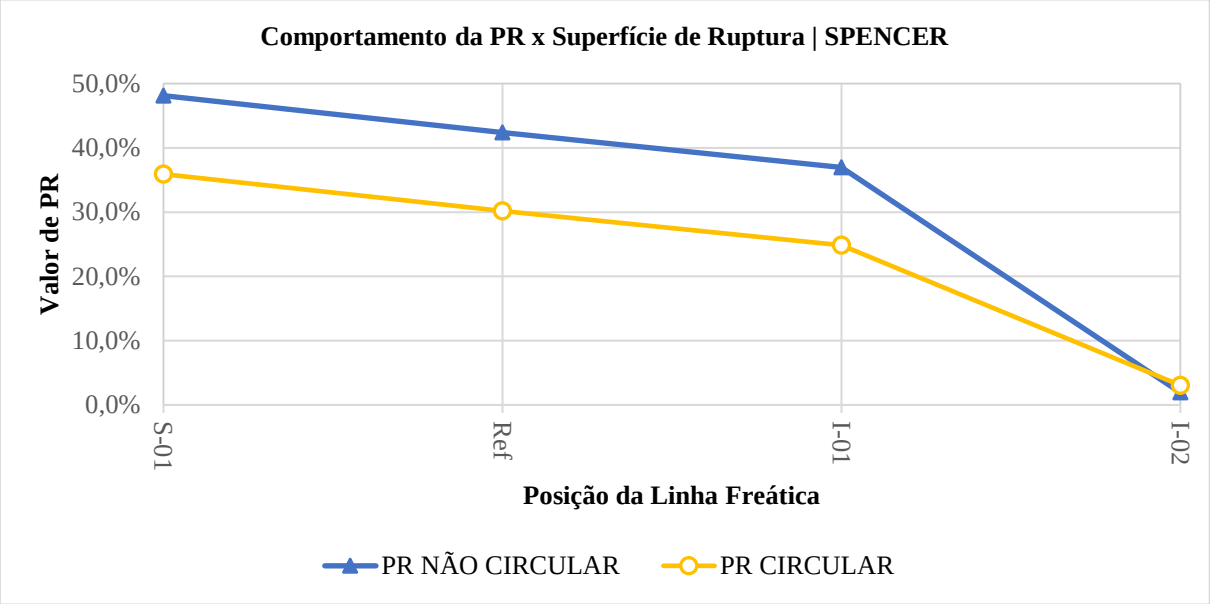
da estrutura. Tal fato pode ser interpretado de forma positiva, já que quanto maior o valor obtido, mais confiável é o Fator de Segurança.

Vale ressaltar que também houve uma ligeira variação de resultados entre os métodos de Equilíbrio Limite utilizados. Os valores de β encontrados foram maiores para o método de Spencer em 6 dos 8 cenários estudados, considerando-se a posição das freáticas e superfícies de ruptura. Embora os resultados sejam semelhantes para os dois métodos, esta diferença pode ser justificada em função da formulação matemática única de cada método.

O comportamento da Probabilidade de Ruptura é contrário ao do Índice de Confiabilidade; quanto mais alto o nível d'água no interior do reservatório, maior é a Probabilidade de Ruptura. Para exemplificar este fato, verifica-se um aumento de 15,45% na Probabilidade de Ruptura quando a posição da freática passa de REF para S-01 no método de Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular. O valor da diferença é ainda maior para superfície circular, sendo de 18,06%. Seguindo o mesmo raciocínio, porém em relação à freática REF para a I-01, a redução foi de 15,03% e 16,63% para superfície de ruptura não circular e circular, respectivamente. Já para o método de Spencer, o aumento da freática REF para S-01 foi de 13,54% para a superfície de ruptura não circular e 18,99% para a circular. A redução de REF para I-01 foi de 12,81% e 17,59% para superfície não circular e circular respectivamente. Observa-se que há uma convergência entre os resultados obtidos para ambos os métodos.

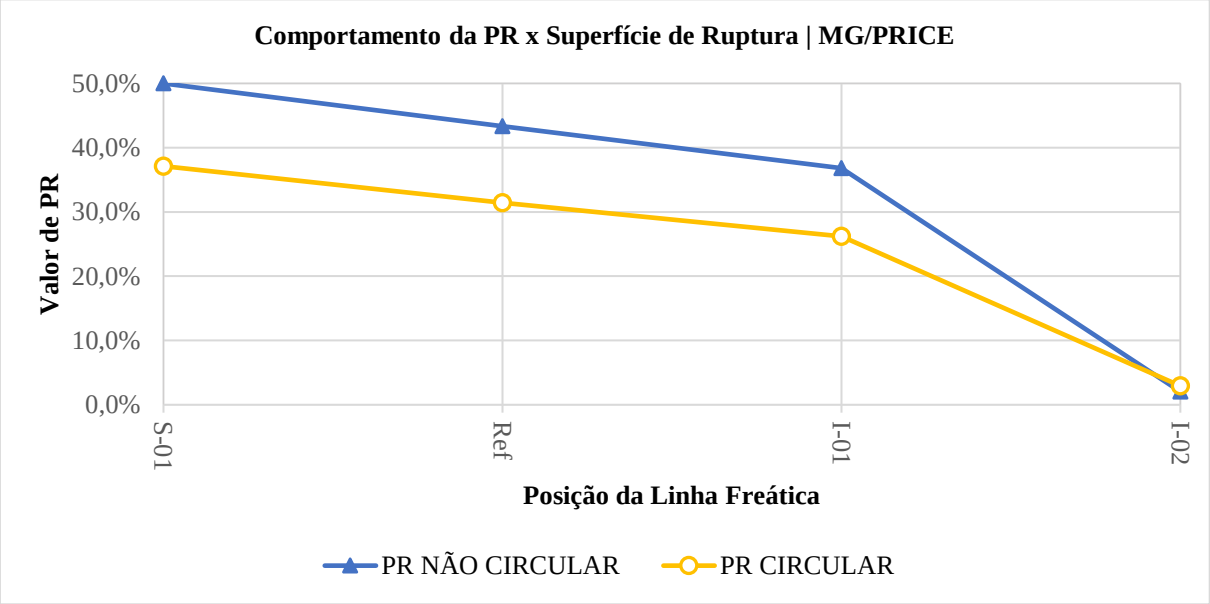
A variação da PR em relação à superfície de ruptura circular e não circular para os métodos de Spencer e Morgenstern-Price são apresentados nos Gráficos 8 e 9, nesta ordem. Observa-se que para a freática S-01, com superfície de ruptura circular, o valor de PR encontrado foi de 37,13% ou 1:2,70 para o método de Morgenstern-Price, sugerindo que, para cada 2 ou 3 barragens construídas de forma similar, uma chegaria à ruptura. Para mesma posição do nível d'água e método de Equilíbrio Limite, alterando-se a superfície de ruptura para não circular, o valor de PR foi de 50% (1:2), representando um aumento de aproximadamente 35% em relação à superfície de ruptura circular.

Gráfico 8 - Comportamento da PR x Superfície de Ruptura | SPENCER.



Fonte: Autor.

Gráfico 9 - Comportamento da PR x Superfície de Ruptura | MORGENSTERN-PRICE.



Fonte: Autor.

Nos Quadros 19 e 20, apresenta-se o aumento porcentual da PR para freáticas S-01, REF e I-01, calculado por regra de três simples, comparando-se a superfície de ruptura circular a não circular, considerando o método de Morgenstern-Price e Spencer, nesta ordem. A comparação entre as freáticas I-02¹ e I-02² foi descartada, visto que a posição de cada uma é diferente.

Quadro 19 - Aumento (em %) - Morgenstern-Price.

FREÁTICA	PR (%)		AUMENTO EM %
	SUPERFÍCIE DE RUPTURA		
	CIRCULAR	NÃO CIRCULAR	
S-01	37,13	50,00	35
REF	31,45	43,31	38
I-01	26,22	36,80	41

Fonte: Autor.

Quadro 20 - Aumento (em %) - Spencer.

FREÁTICA	PR (%)		AUMENTO EM %
	SUPERFÍCIE DE RUPTURA		
	CIRCULAR	NÃO CIRCULAR	
S-01	35,91	48,13	34
REF	30,18	42,39	40
I-01	24,87	36,96	49

Fonte: Autor.

O Quadro 21 apresenta uma comparação com os resultados obtidos por Braga (2019) avaliando a mesma estrutura. Os valores de PR e β obtidos foram semelhantes, principalmente para o método de Equilíbrio Limite de Morgenstern-Price.

Quadro 21 - Comparação com Braga (2019).

FREÁTICA	SUPERFÍCIE CIRCULAR			
	PR (% e fração)		β	
	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER	MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
REF	31,45 1/3,18	30,18 1/3,31	0,483	0,519
Braga (2019)	28,00 1/3,5	22,00 1/4,5	0,580	0,760

Fonte: Autor.

4.2.1.2 - Verificação da Influência dos Parâmetros Geotécnicos

Uma das vantagens do método FOSM em relação aos outros métodos probabilísticos é a quantificação da influência relativa em porcentagem de cada parâmetro na variância do Fator

de Segurança, permitindo, por consequência, descartar as variáveis de menor relevância no cálculo da Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade pelo método de Monte Carlo.

Vale ressaltar que essa vantagem é de extrema importância, pois conhecer os parâmetros que mais contribuem na variância do Fator de Segurança pode ser vital para tomada de decisão em relação a segurança da estrutura, seja no intuito de reforçar uma barragem existente, entender a necessidade de executar um rebaixamento da linha freática ou mesmo no projeto de novos alteamentos.

Os Quadros 22 e 23 apresentam a contribuição de cada parâmetro para cada freática analisada, para superfície de ruptura não circular e circular, respectivamente. Os dois parâmetros mais influentes em cada análise foram hachurados com a cor do material no qual parâmetro está inserido.

Quadro 22 - Influência das variáveis pelo método FOSM – Superfície não circular.

INFLUÊNCIA									
MATERIAL	PARÂMETRO	S-01		REF		I-01		I-02	
		EQUILIBRIO LIMITE							
		MORG.-PRICE	SPENCER	MORG.-PRICE	SPENCER	MORG.-PRICE	SPENCER	MORG.-PRICE	SPENCER
Solo Residual	γnat (KN/m³)	0,00%	0,00%	0,05%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
	c' (kPa)	0,00%	0,00%	0,37%	0,00%	0,36%	1,34%	0,00%	0,32%
	ϕ(graus)	0,00%	0,00%	0,09%	0,16%	0,01%	0,14%	0,01%	0,03%
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	0,19%	0,11%	0,23%	0,05%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%
	c' (kPa)	1,59%	0,39%	1,50%	3,39%	0,36%	0,34%	0,00%	0,00%
	ϕ (graus)	0,38%	0,37%	0,25%	0,04%	0,09%	0,14%	0,38%	0,30%
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	0,01%	0,05%	0,00%	0,00%	0,13%	0,09%	0,04%	0,01%
	ϕ (graus)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%	0,01%	0,00%	0,01%
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	0,08%	0,00%	0,03%	0,07%	0,00%	0,00%	0,08%	0,04%
	ϕ (graus)	0,09%	0,04%	0,25%	0,01%	0,01%	0,08%	2,51%	3,03%
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	0,62%	0,74%	0,99%	1,15%	0,95%	0,75%	0,66%	0,97%
	Su|(σ'vo)	96,14%	97,48%	95,25%	93,50%	95,54%	95,51%	87,31%	86,60%
Rejeito	γnat (KN/m³)	0,22%	0,15%	0,01%	0,15%	0,02%	0,08%	0,55%	0,60%
	ϕ (graus)	0,67%	0,66%	0,99%	1,43%	2,43%	1,50%	8,44%	8,07%
TOTAL									**100,00%**

Fonte: Autor.

Quadro 23 - Influência das variáveis pelo método FOSM – Superfície circular.

INFLUÊNCIA									
MATERIAL	**PARÂMETRO**	**S-01**		**REF**		**I-01**		**I-02**	
		EQUILIBRIO LIMITE							
		MORG.-PRICE	**SPENCER**	**MORG.-PRICE**	**SPENCER**	**MORG.-PRICE**	**SPENCER**	**MORG.-PRICE**	**SPENCER**
Solo Residual	γnat (KN/m³)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	c' (kPa)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	ϕ(graus)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	0,04%	0,04%	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%
	c' (kPa)	0,36%	1,39%	0,00%	0,37%	0,34%	0,00%	0,00%	0,00%
	ϕ (graus)	0,76%	1,11%	0,34%	0,48%	0,58%	0,80%	0,00%	0,00%
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	0,10%	0,22%	0,07%	0,14%	0,13%	0,10%	0,07%	0,09%
	ϕ (graus)	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	ϕ (graus)	0,01%	0,08%	0,15%	0,35%	0,00%	0,00%	0,11%	0,02%
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	0,94%	1,39%	0,80%	0,99%	0,90%	0,98%	0,88%	0,82%
	Su|(σ'vo)	94,91%	92,33%	96,26%	94,79%	95,38%	94,54%	81,31%	78,89%
Rejeito	γnat (KN/m³)	0,14%	0,14%	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,39%	0,13%
	ϕ (graus)	2,72%	3,31%	2,39%	2,85%	2,61%	3,55%	17,24%	20,05%
TOTAL									**100,00%**

Fonte: Autor.

Nota-se que, independentemente do método de Equilíbrio Limite, do tipo de superfície de ruptura e da posição da linha freática considerados, a razão de resistência Su/(σ'vo) do rejeito saturado foi o parâmetro que mais contribuiu nos resultados das análises de estabilidade. Analisando-se a flutuação do nível d'água no interior da estrutura, tal parâmetro teve influência entre 86,60% e 97,48% considerando a superfície não circular e 78,89% a 96,26% para a superfície circular. O resultado se mostra coerente e pode ser explicado por um acúmulo de fatores, como por exemplo:

1. O método construtivo da estrutura, que utiliza rejeito saturado como fundação para alteamentos.
2. O rejeito ser o material predominante nas superfícies de ruptura críticas.
3. A posição da linha freática, fazendo com que grande parte do rejeito ficasse saturado, e, portanto, modelado utilizando a razão de resistência não-drenada de pico.

Após os cálculos probabilísticos efetuados na mesma estrutura, Braga (2019) também concluiu que a razão de resistência Su/(σ'vo) do rejeito saturado foi o parâmetro que mais influenciou nas análises em termos de tensões totais, considerando os mesmos métodos de Equilíbrio Limite.

O ângulo de atrito do rejeito foi o segundo parâmetro que mais contribuiu para variação do Fator de Segurança, principalmente para superfície de ruptura circular, corroborando o resultado obtido por Braga (2019). Para superfície não circular, especificamente para as freáticas S-01 e REF, a coesão do solo compactado teve uma maior contribuição quando comparado ao ângulo de atrito do rejeito.

Observa-se que o ângulo de atrito do rejeito teve uma contribuição maior que 8% para a freática denominada I-02. Conforme se reduz a elevação do nível d'água, gera-se uma tendência de aprofundamento da posição da superfície de ruptura, tendo em vista que apenas o rejeito abaixo da linha freática é modelado com resistência não drenada, tal observação pode ser comprovada ao comparar as Figuras 28 e 31. Nesse caso, o ângulo de atrito do material passa a exercer mais influência no cálculo do Fator de Segurança, já que há um aumento da tensão vertical e a resistência por atrito no critério de Mohr-Coulomb é diretamente proporcional a tensão normal atuante no plano de ruptura (SILVA, 2021).

Somando-se tal fato com o resultado encontrado por Braga (2019), a razão de resistência Su/(σ'vo) do rejeito saturado e o ângulo de atrito do rejeito foram os parâmetros variáveis

considerados nas análises pelo método de Monte Carlo. Os demais parâmetros se mostraram pouco influentes, e por isso, foram descartados reduzindo consideravelmente o número de iterações envolvidas na aplicação deste método.

4.2.2 - Monte Carlo

Conforme mencionado no tópico anterior, os dois parâmetros utilizados na aplicação do método foram os que mais influenciaram na variação do Fator de Segurança pelo FOSM, sendo eles: a razão de resistência Su/(σ'vo) do rejeito saturado e o ângulo de atrito do rejeito. Os valores do desvio padrão, bem como o máximo e mínimo relativo inseridos para cada parâmetro estão apresentados no Quadro 24.

Quadro 24 - Dados estatísticos utilizados para aplicar o método de Monte Carlo.

MATERIAL	PARÂMETRO	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA	VALOR MÉDIO	σ (Xi)	RELATIVO	
					MÍNIMO	MÁXIMO
Rejeito Saturado	Su/(σ'vo)	NORMAL	0,260	0,039	0,117	0,117
Rejeito	ϕ (graus)		35,000	4,55	13,65	13,65

Fonte: Autor.

Definiu-se pela utilização do software *Slide 2D*, por meio do método *Overall Slope*. Empregando-se a Equação 8, o número de simulações (N) foi de 4522.

Os resultados das análises probabilísticas obtidas com a aplicação do Método de Monte Carlo são apresentados nos Quadros 25 e 26 e podem ser vistas de forma completa no Apêndice II.

Quadro 25 - Valores de PR (em % e fração) e β para superfície de ruptura circular.

FREÁTICA	PR				β	
	MORGENSTERN-PRICE		SPENCER		MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
S-01	36,38%	1/2,75	35,16%	1/2,84	0,360	0,409
REF	29,90%	1/3,34	28,53%	1/3,50	0,512	0,560
I-01	25,01%	1/4,00	23,60%	1/4,24	0,674	0,725
I-02[1]	2,62%	1/38,17	2,27%	1/44,05	2,033	2,090

Fonte: Autor.

Quadro 26 - Valores de PR (em % e fração) e β para superfície de ruptura não circular.

FREÁTICA	PR				β	
	MORGENSTERN-PRICE		SPENCER		MORGENSTERN-PRICE	SPENCER
S-01	47,52%	1/2,10	45,44%	1/2,20	0,037	0,084
REF	40,80%	1/2,45	39,78%	1/2,77	0,193	0,235
I-01	34,08%	1/2,93	32,62%	1/3,06	0,391	0,426
I-02[2]	1,88%	1/53,20	1,77%	1/56,50	2,179	2,226

Fonte: Autor.

Assim como os resultados obtidos com a aplicação do Método FOSM, à medida que a linha freática se afasta verticalmente da crista da estrutura, os valores de PR e β se comportam a favor da segurança, porém, abaixo dos admissíveis pela literatura (Tabela 2).

Entre os dois métodos de Equilíbrio Limite avaliados, o Índice de Confiabilidade apresentou valores ligeiramente superiores para o método de Spencer. Tal resultado também foi obtido por Vecci (2018) ao analisar um talude de mineração. Já a Probabilidade de Ruptura, foi mais crítica para o de Morgenstern-Price.

Nota-se uma diferença relativamente significativa ao comparar os resultados encontrados considerando a superfície de ruptura circular e não circular, sendo que a última apresenta valores mais críticos para a Probabilidade de Ruptura e, portanto, para o Índice de Confiabilidade.

4.2.3 - Comparação entre os Métodos Probabilísticos

As análises de estabilidade probabilísticas efetuadas com os métodos FOSM e Monte Carlo foram comparadas considerando a posição da linha freática, a superfície de ruptura circular e não circular, bem como os dois métodos de Equilíbrio Limite empregados. Os resultados são apresentados nos Quadros 27 e 28.

Quadro 27 - Resumo dos resultados de Probabilidade de Ruptura (FOSM e MC).

FREÁTICA		PR							
		MORGENSTERN-PRICE				SPENCER			
		CIRCULAR		NÃO CIRCULAR		CIRCULAR		NÃO CIRCULAR	
		FOSM	MC	FOSM	MC	FOSM	MC	FOSM	MC
S-01	%	37,13	36,38	50,00	47,52	35,91	35,16	48,13	45,44
	FRAÇÃO	1/2,70	1/2,75	1/2,00	1/2,10	1/2,78	1/2,84	1/2,08	1/2,20
REF	%	31,45	29,90	43,31	40,80	30,18	28,53	42,39	39,78
	FRAÇÃO	1/3,18	1/3,34	1/2,31	1/2,45	1/3,31	1/3,50	1/2,36	1/2,77
I-01	%	26,22	25,01	36,80	34,08	24,87	23,60	36,96	32,62
	FRAÇÃO	1/3,81	1/4,00	1/2,72	1/2,93	1/4,02	1/4,24	1/2,70	1/3,06
I-02	%	2,93	2,62	2,04	1,88	3,05	2,27	1,92	1,77
	FRAÇÃO	1/34,13	1/38,17	1/49,02	1/53,20	1/32,79	1/44,05	1/58,14	1/56,50

Fonte: Autor.

Quadro 28 - Resumo dos resultados de Índice de Confiabilidade (FOSM e MC).

FREÁTICA	β							
	MORGENSTERN-PRICE				SPENCER			
	CIRCULAR		NÃO CIRCULAR		CIRCULAR		NÃO CIRCULAR	
	FOSM	MC	FOSM	MC	FOSM	MC	FOSM	MC
S-01	0,328	0,360	0,000	0,037	0,361	0,409	0,047	0,084
REF	0,483	0,512	0,168	0,193	0,519	0,560	0,192	0,235
I-01	0,636	0,674	0,372	0,391	0,679	0,725	0,333	0,426
I-02	1,891	2,033	2,045	2,179	1,873	2,090	2,115	2,226

Fonte: Autor.

Para todas as posições de freática avaliadas, maiores valores de PR foram obtidos pelo método FOSM em relação ao MC, apresentando uma diferença máxima de aproximadamente

10%. Tal resultado corrobora com os encontrados por Silva (2015), Araújo e Sayão (2018) e Vecci (2018) ao comparar as duas metodologias em suas pesquisas.

A escolha do método de Equilíbrio Limite afetou os valores de β e PR obtidos pelos dois métodos probabilísticos aplicados nesta pesquisa, corroborando com os resultados encontrados por Vecci (2018), Farias e Assis (1998) e Dell' Avanzi (1995). Contudo, essa influência foi mínima, visto que ambos são baseados em metodologias rigorosas para análises de estabilidade. O método de Morgenstern-Price apresentou maiores valores de PR quando comparado ao de Spencer, independentemente da posição da freática analisada. Para o Índice de Confiabilidade, o método de Spencer apresentou valores maiores.

A escolha da superfície de ruptura se mostrou de suma importância para avaliação da segurança desta estrutura. Os resultados encontrados para superfície de ruptura não circular, em qualquer posição da freática, são mais críticos quando comparados com a circular.

Em ambos os métodos probabilísticos a posição da linha freática no interior da barragem influenciou de forma significativa os valores de PR e β. Houve uma redução relevante da PR com o rebaixamento da freática. Ao analisar os valores mais críticos pelo método FOSM (Morgenstern-Price e ruptura não circular) observa-se que a PR passou de 50,00% para 2,04%, o β de 0,00 para 2,045. Já por Monte Carlo (Morgenstern-Price e ruptura não circular), a PR foi de 47,52% para 1,88% e o β de 0,037 para 2,179.

5 - CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a aplicação de métodos determinísticos e probabilísticos para cálculo da estabilidade de uma estrutura de contenção de rejeitos alteada pelo método de montante. Os métodos de Equilíbrio Limite utilizados foram o de Morgenstern-Price e Spencer, considerados rigorosos. A Probabilidade de Ruptura e o Índice de Confiabilidade, produtos da análise probabilística, foram obtidos a partir dos métodos FOSM e Monte Carlo. O objetivo central da pesquisa foi analisar o nível de segurança do projeto considerando diferentes posições da linha freática no interior da barragem, comparar os resultados dos métodos probabilísticos e determinísticos, verificar a influência da superfície de ruptura circular e não circular nos cálculos, além de entender qual parâmetro geotécnico mais contribuiu para variância dos Fatores de Segurança encontrados.

Em relação aos resultados obtidos pelos métodos determinísticos, os valores dos Fatores de Segurança para as freáticas S-01, REF e I-01, independentemente do método de Equilíbrio Limite ou superfície de ruptura analisadas, ficaram abaixo do preconizado pela Resolução ANM n° 95/2022 para que uma estrutura submetida à condição não-drenada não entrasse em nível de emergência, cujo valor mínimo é de 1,3. Ressalta-se que o valor do Fator de Segurança encontrado para a freática S-01, ficou próximo ao obtido pela TUV SUD (2018), Braga (2019) e D'Hyppolito (2023).

As freáticas I-02[1] e I-02[2] evidenciaram que, mantendo-se a tendência de queda dos valores dos instrumentos apontada no Painel de Especialistas (ROBERTSON *et al.*, 2019), o Fator de Segurança mínimo (FS =1,3) seria alcançado quando a freática estivesse verticalmente a 51,0m da crista e 15,5m do recuo, considerando a ruptura não circular. Já para ruptura circular o FS mínimo seria alcançado quando o nível d'água estivesse verticalmente a 46,8m da crista e a 14,0m do recuo. Entretanto, mesmo com Fator de Segurança acima de 1,3, a Probabilidade de Ruptura é considerada alta (variando de 1,77 a 3,05%), de acordo com a os valores apresentados Dell'Avanzi e Sayão (1998). Tal resultado evidencia a fragilidade da legislação brasileira ao utilizar o Fator de Segurança único como um dos critérios para enquadrar uma barragem em determinado nível de emergência, principalmente as barragens alteadas por montante.

Vale mencionar que cada estrutura geotécnica é única e o intuito da modelagem computacional é a busca de resultados que se aproximem ao máximo da realidade. Portanto, para efetuar uma análise de estabilidade, a escolha da superfície de ruptura deve ser feita de

forma minuciosa, avaliando-se a geometria, o tipo de material constituinte e parâmetros de resistência envolvidos. Neste estudo, os resultados considerando a superfície de ruptura não circular foram mais críticos do que a circular.

Ao comparar os resultados encontrados pelos métodos probabilísticos, considerando cada posição de nível d'água avaliado, o FOSM foi mais conservador, apresentando valores maiores de Probabilidade de Ruptura e menores para o Índice de Confiabilidade. À medida com que a posição da linha freática se afasta verticalmente da crista da barragem, os valores de PR e β tornam-se favoráveis à segurança da estrutura. Contudo, os valores encontrados para Probabilidade de Ruptura e Índice de Confiabilidade, em todas as condições avaliadas, ficaram abaixo do admissível pela literatura revisada (Tabela 2).

O método probabilístico FOSM permitiu a identificação da influência relativa de cada parâmetro geotécnico na variância do Fator de Segurança, sendo possível utilizar tal informação para otimizar a aplicação do método de Monte Carlo. Para esta estrutura, os parâmetros que mais contribuíram para o Fator de Segurança são apresentados nos Quadros 22 e 23, sendo a razão de resistência Su/(σ'vo) do rejeito saturado e o ângulo de atrito do rejeito os parâmetros definidos para o cálculo do Índice de Confiabilidade e Probabilidade de Ruptura através do método de Monte Carlo.

Entre as freáticas analisadas, a S-01, a qual representa um aumento do nível de água devido a pluviosidade característica do período da ruptura, considerando a superfície de ruptura não circular, cujo valor de FS para o método de Mongenstern-Price foi de 1,000 com PR de 50% pelo FOSM (uma em cada duas estruturas construídas com a geometria idêntica e condições de contorno similares, sofreria ruptura), é considerada a posição mais crítica em que a Barragem I já foi submetida. Na prática, submetida a essas condições, a estrutura apresentaria sinais de instabilidade, porém, de acordo com ROBERTSON *et al.*, (2019), a resistência adicional em razão do processo de cimentação característico dos rejeitos dispostos no reservatório, permitiu, particularmente a construção de um talude mais íngreme sem indícios de instabilidades, mesmo que este pudesse ser potencialmente instável. A instabilidade pode ocorrer quando um fenômeno qualquer provoque a perda de resistência não-drenada em partes da estrutura. Quanto maior a perda de resistência e maiores as tensões na barragem, mais abrupta será a ruptura.

Em situações similares a este estudo de caso, recomenda-se a utilização do método FOSM para avaliação da segurança das barragens de rejeitos, uma vez que apresentou resultados mais conservadores em relação ao método MC em todas as posições de freáticas analisadas, por apresentar os parâmetros que mais contribuem na variância do Fator de Segurança, além de ser mais prático e de fácil aplicação.

Ainda, como sugestão para estudos futuros, recomenda-se:

- Acrescentar outros métodos probabilísticos, como Estimativa Pontual (EP);
- Acoplar as análises probabilísticas aos estudos de fluxo e tensão-deformação;
- Acrescentar mais parâmetros na aplicação do método de Monte Carlo com intuito de aumentar o número de iterações;
- Refazer os cálculos utilizando o desvio padrão da resistência não-drenada de pico oriundo dos ensaios de CPTU realizados na estrutura ao longo da sua vida útil;
- Considerar um cenário onde todo o reservatório apresente razão de resistência não drenada de pico (Su/σ'v0);
- Vincular os resultados das análises probabilísticas ao Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração (PGRBM), item obrigatório para barragens com dano potencial associado alto, de acordo com a Resolução ANM n°95/2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W; LEE, T. S; SHARMA, S; BOYCE, G. M. **Slope Stability and Stabilization Methods**, 2^{n} ed. New Yotk: John Wiley e Sons, p. 330-378, 2001. ISBN: 978-0-471-38493-9.

AGUILERA, C. E. T. **Aplicação de Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes de Grande Altura em Mineração**. 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/31859/31859_1.PDF. Acesso em: 09 ago. 2023.

ANG, A. H-S; TANG, W. H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume II Decision, Risk and Realiability.** New York: John Wiley e Sons Inc., 2007.

ARMSTRONG, M; PETTER, R; PETTER, C; VARGAS, F.G. Why have so man tailings dams failed in recent years? **Resour. Policy** 63, 101412, Rio de Janeiro, 2019. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412.

ARAUJO, M. B; SAYÃO, A. S.F. J. Análise probabilística da estabilidade da barragem de santa branca. **Revista brasileira de engenharia de barragens**, n. 06, 2018.

ASSIS, A.P; ESPÓSITO, T.J; GARDONI, M.G; SILVA, P. D. E. A; J.A. MAIA. Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. Publicação G.A P002/2012. **Apostila do curso de Pós-Graduação em Geotecnia**, UNB, Brasília. 2012.

AZAM, S; ALI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. **Waste Geotechnical News**, v. 28, n. 4, p. 50-53, 2010.

BABU, G.L.S; SRIVASTAVA, A. Reliability analysis of earth dams. **J Geotech Geoenviron,** v. 136, n. 7, p. 995–998, 2010. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000313.

BAECHER, G.B; CHRISTIAN, J.T. **Reliability and statistics in geotechnical engineering.** New York: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-49833-5.

BARBETTA, P. A; REIS, M. M; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 3ª. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BENSON, C. H; DANIEL, D. E; BOUTWELL, G. P. Field performance of compacted clay liners. **J. Geotech. and Geoenvir. Engrg**., ASCE, v. 125, n. 5, p. 390–403, 1999. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:5(390).

BERTOZZI; S.O.S; LINHARES; R.M; HARTMANN, D.A. **Análises Probabilística e Determinísticas da Estabilidade de umTalude na Cidade de Lavras/MG**, VIII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), 2021. Porto de Galinhas, PE, pp. 435-443.

BISHOP, A. W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes **Geotechnique**, v. 5, n. 1, 1955. https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7.

BONATTO, I. **Soluções construtivas para estabilização de barragens de rejeitos alteadas a montante:** Um estudo de caso de Brumadinho. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: http://www.dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/05/ISABELLA-BONATTO-Trabalho-Final-de-Curso_corrigido.pdf.. Acesso em: 17 ago. 2023.

BRAGA, V. P. C. **Análise Probabilística da Estabilidade de uma barragem de rejeitos.** Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado da Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. 2019. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/52748/52748.PDF. Acesso em: 05 mai. 2023

BRASIL. **Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a

redação do art. 35 da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei 9984, de 17 de julho de 2000, Brasília, 2010. Disponível em: D.O.U de 21/09/2010, pág. nº 1.

BRASIL. CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução n. 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7° da Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010, Brasília, 2012. Disponível em: D.O.U em 04/09/2012.

BRASIL. DNPM. **Portaria n° 70.389, de 17 de maio de 2017**. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração. Brasília, 2017. Disponível em: DOU de 19 de maio de 2017, Seção 1, páginas 68 a 7.

BRASIL. **Lei n° 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei n° 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei n° 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração), Brasília, 2020. Disponível em: DOU de 01/10/2020, Edição: 189, Seção: 1, Página: 3.

BRASIL. ANM - Agência Nacional de Mineração. Resolução n° 13, de 8 de agosto de 2019. **Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências.** Brasília, 2019. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027. Acesso em: 11 jul. 2023.

BRASIL, 2022. ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução n° 95, de 07 de fevereiro de 2022.** Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Disponível em https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962. Acesso em: março de 2022.

CAMBRIDGE, P; SHAW, S. Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019, **Dams Reserv**., v. 29, p. 113-123, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119.

CAMPELLO, I. C. **Abordagem Probabilística Aplicada ao Estudo da Variabilidade Geotécnica dos Solos**. 158f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/35656/1/2020%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Izabela%20Campello.pdf>

CAO, Z; LI, D; WANG, Y. **Probabilistic Approaches for Geotechnical Site Characterization and Slope Stability Analysis.** 1 ed. Heidelberg: SPRINGER, 2017. 190 p.

CARDOZO, F. A. C; PIMENTA, M. M; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração –uma revisão. **Holos**, v. 8, n. 32, 77-85, 2016. Disponível em: < https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/download/5367/pdf/15082>.

CARVALHO, G. B. **Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito**. 207 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: < https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10689>.

CAVALCANTE, A. L. B. **Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante**. 297 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília – DF, 2000.

CHO S. E. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes. **Eng Geol, v.** 154, p. 98–105, 2013. DOI:10.1016/j.enggeo.2012.12.014.

CORPS OF ENGINEERS, Engineering and Design Introduction to Probability and Reability Methods for Use in Geotechnical Engineering, **Engineering Technical Letter N 1110-2-547**, Department of the Army, U. S., Washington, DC. 1997.

COSTA, L. F. **Utilização de rejeito de minério de ferro na formulação de tijolos ecológicos**. Monografia (Especialização em em Gestão Estratégica de Negócios - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. p. 32. 2021.

CHRISTIAN, J.T., LADD, C. C; BAECHER, G.B. Reliability Applied to Slope Stability Analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 120, n. 12, p. 2180-2207. 1992. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:12(2180).

DELL'AVANZI, E. **Confiabilidade e Probabilidade em Análises de Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. 1995.

DELL'AVANZI, E; SAYÃO, A. S. F. J. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: **XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, ABMS, Brasília. 1998.

D'HYPPOLITO, L. C.B.S. **Análise do Risco de Liquefação em Barragens de Rejeitos**. Rio de Janeiro. 191p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2023.

DIXON-HARDY, D.W; ENGELS, J.M. Guidelines and recommendations for the safe operation of tailings management facilities. **Environ. Eng. Sci**., v. 24, p. 625–637, 2007. DOI:10.1089/ees.2006.0133.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Dissertação (Mestrado em em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. p. 130. 2008.

DUNCAN J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 4, p. 307-16. 2000.

DUNCAN, J. M; WRIGHT, S. G. **Soil strength and slope stability**.1ª edição, New Jersey: John Willey e Sons, 2005. ISBN 978-1-118-65165-0.
DUNCAN, J. M.; Wright, S. G.; Brandon, T. L. **Soil Strength and Slope Stability**, second edition. New Jersey: Wiley, 2014.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

ESPÓSITO, T. J; DUARTE, A. P. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. **Rem**: **Rev. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 63, n. 2, p. 393-398, 2010. https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200026.

FALCÃO, P; FAGUNDES, D; ALVES, A. Análise Probabilística de Aterro sobre Solos Moles. **VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, Universidade Federal do Rio Grande, vol. 30. no. 1, p. 38-48, 2020. https://doi.org/10.14295/vetor.v30i1.12905.

FARIAS, M. M; ASSIS, A.P. Uma Comparação entre Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes. In: **XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - XICOBRAMSEG**. ABMS, Brasília, DF, 2: 1305-1313. 1998.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2020. 47 p. 2020.

FERNANDES, R.B.; PINHO, T. F.; MORAES, L.H.; SOUZA, L.A. Análise dos dados históricos da produção mineral brasileira entre os anos de 1997 a 2020. In: **17º CBGE**. id 86, 2022. Disponível em:

https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_86.pdf. Acesso em: 05 nov. 2022.

FERNANDES, R, B. **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. 241f. 2020. Disponível em: http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/17662. Acesso em: 14 mar. 2023.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de jambu e Spencer**. Dissertação (Mestrado Integrado em engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf. Acesso em: 13 set. 2022.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2008. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12093

FREITAS NETO, O; ARAUJO, L. F. C; GOMES, W. V; SILVA, P. J. L; GONÇALVES, P. H; SANTOS JR., O. Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 10–27, 2022. DOI: 10.21680/2447-3359.2022v8n1ID25727.

G YIN; G. LI; Z. WEI; L. WAN; G. SHUI; X. JING. Stability analysis of a copper tailings dam via laboratory model tests: A Chinese case study Miner. **Eng.,** v. 24, n. 2, p. 122-130, 2011. DOI:10.1016/j.mineng.2010.10.014.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GIACON JUNIOR, A. J. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de São Paulo, Bauru, 2018.

GOMEZ, C; KNEIPP, J; KRUGLIANSKAS, I; ROSA, L; BICHUETI, R. Management for sustainability in companies of the mining sector: an analysis of the main factors related with the business performance. **Elsevier, Resources Policy**, v. 84, p. 84-93, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.030.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2397>.

GRIFFITHS, D. V; FENTON, G. A. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. **Internacional Centre For Mechanical Sciences**, New York, p. 71-112. 2007.

GUI, S.X; ZHANG, R.D; TURNER, J.P; XUE, X.Z. Probabilistic slope stability analysis with stochastic soil hydraulic conductivity. **J Geotech Geoenviron,** v.126, n. 1, p. 1–9, 2000. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:1(1).

GUO, X; DIAS, D; CARVAJAL, C; PEYRAS, L; BREUL, P. Reliability analysis of embankment dam sliding stability using the sparse polynomial chaos expansion. **Engineering Structures,** v. 174, p. 295-307, 2018. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.07.053.

HARR, M. E. **Reliability-Based Design in Civil Engineering**. Henry M. Shaw Lecture. Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, USA, 1984.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences**. Paris: UNEP/ICOLD, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 128 p. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 128 p. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Setor Mineral**. Brasília: IBRAM, 47 p. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Setor Mineral – Primeiro Semestre de 2023**. Brasília: IBRAM, 44 p. 2023.

JAKKA, R.S; RAMANA, G; DATTA, M. Seismic slope stability of embankments constructed with pond ash. **Geotech Geol Eng,** v. 29, n. 8p. 21–35, 2011. DOI:10.1007/s10706-011-9419-8.

JANBU, N. Application of composite slip surface for stability analysis. **Proc. European conf. Stability of earth slopes**, v. 3, p. 43-49, 1954 a.

JANBU, N. **Stability analysis of slopes with dimensionless parameters**. Thesis (Ph. D in Civil Egineering) - Faculty of Arts and Sciences of Harvard University, 1954 b.

JANBU, N. Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices. Proceedings, **4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, London, v. 2, p. 207-212, 1957.

JANBU, N. Slope Stability Computation. **Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume**, ed. New York: John Wiley and Sons, p.49-86, 1973.

KLOHN, E, J. The development of current tailing dam design and construction methods. In: **Design and Construction of Tailing Dams**, D. Wilson (ed.), Colorado School of Mines, Golden, USA, 1981.

KOSSOFF, D; DUBBIN, W. E; ALFREDSSON, M; EDWARDS, S. J; MACKLIN, M. G; HUDONS-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure,

environmental impacts and remediation, **Appl. Geochem**., v. 51, p. 229–245, 2014. DOI:10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.

KULHAWY, F. H. On Evaluation of Static Soil Properties. In **Stability and Performance of Slope and Embankments II**, Edited by R.B. Seed and R.W. Boulanger, ASCE, New York, pp. 95 -115, 1992.

KUMAR, V; SAMUI, P; HIMANSHU, N; BURMAN, A. Reliability-based slope stability analysis of Durgawati earthen dam considering steady and transient state seepage conditions using MARS and RVM. **Indian Geotech J**, 16–18, 2019. DOI:10.1007/s40098-019-00373-7.

LACASSE, S; NADIM, F. Uncertainties in characterizing soil properties, **Norwegian Geotechnical Institute**, n. 201, p. 49–75, 1997.

LUMBROSO, D; DAVISON, M; BODY, R; PETKOVŠEK, G. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, 21, 21–37, https://doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021, 2021.

LUMBROSO, D; MCELROY, C; GOFF, C; ROCA COLLELL, M; PETKOVŠEK, G; WETTON, M. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information, **Int. J. Disast. Risk Reduct**., 38, 101209, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101209, 2019.

MACHADO, L. V. T; AZEEZ, D. G. Incidentes e acidente em barragens. **Anais do 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade**, Rio de Janeiro, v.1, n.1, 2018. Disponível em < https://itr.ufrrj.br/sigabi/wpcontent/uploads/7_sigabi/VASCONCELLOS_LUCAS_355a358.pdf>. Acesso em 11 de março de 2022.

MANCINI, L; SALA, S. Social impact assessment in the mining sector: review and comparison of indicators frameworks. **Elsevier, Resources Policy**, v. 57, p. 98-111, 2018. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002.

MENDES, L. O. **Análise probabilística do potencial de falha por liquefação estática e dinâmica de barragens.** 2019. xx, 147 f., il. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA (MJSP). **Laudo n° 1070/2019 – SETEC/SR/PF/MG**. Laudo de perícia criminal federal (Engenharia). 2019.

MONTEIRO, F.F; ALELVAN, G.M; MATOS, Y.M.P; CARNEIRO, A.A. Análise probabilística e determinística da estabilidade de taludes em barragem de terra do Estado do Ceará. **Atena Editora**, vol. 1, p. 211-221, fevereiro, 2021. DOI: 10.22533/at.ed.69721110218

MORALES, M. S. T. **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas-não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático**. 2013. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeir, 2013. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/23211/23211_1.PDF. Acesso em: 15 jul. 2023.

MORGENSTERN, N.R; PRICE, V.E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. **Géotechnique**, 15, 79-93. 1965. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79

MOUYEAUX, A; CARVAJAL, C; BRESSOLETTE, P; PEYRAS, L; BREUL, P; BACCONNET, C. Probabilistic stability analysis of an earth dam by stochastic finite element method based on field data. **Computers and Geotechnics**; v. 101:34e47. 2018. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.017.

NAEINI, M; A. AKHTARPOUR, Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam, Soil Dyn. **Earthquake Eng**. v. 107, p. 179–194, 2018. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.019.

OLIVEIRA, J. B. V. R. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeito como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e a segurança de barragens**. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotecnica) - Escola de Minas,

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2330. Acesso em: 12 ago. 2023.

PEREIRA, A. B. **Metodologia semiempírica de cálculo de capacidade de carga geotécnica de estacas com base em dados de SPT extrapolados via krigagem e ensaios de carregamento dinâmico**. 293 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/13010. Acesso em: 12 ago. 2023.

PHOON, K.K; KULHAWY, F.H., 1999. Characterization of geotechnical variability. Can. **Geotech. J**. v. 36, n. 4, p. 612–624. https://doi.org/10.1139/t99-038.

PHOON, K.K; CHEN, J.R; KULHAWY, F.H. Characterization of model uncertainties for augered cast-in-place ACIP piles under axial compression. Proc. Foundation Analysis and Design: Innovative Methods (GSP 153), **GeoShanghai**, ASCE, Reston, v. 197, n. 10, p. 82–89. 2006. https://doi.org/10.1061/40865(197)10.

POLÍCIA FEDERAL. **Laudo N° 1070/2019 – SETEC/SR/PF/MG**, Minas Gerais: Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais - Setor Técnico Científico. 2019.

RESO. S. A. **Mineração e seus diversos tipos de resíduos**. Fevereiro de 2015. Disponível em: < http://resoambiental.com/2015/02/mineracao-e-seus-diversos-tiposde-residuos>. Acessado em: Abril de 2022.

REZENDE, V. A. **Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

RICO, M; BENITO, G; SALGUEIRO, A; DIEZ-HERRERO, A; PEREIRA, H.G. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context**. Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/64704. Acesso em: 12 ago. 2023.

ROBERTSON, P. K; MELO, L; WILLIAMS, D. J; WILSON, G. W. **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. 2019. Disponível em http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/report.html. Acessado em: 27 jun. 2022.

RUCHKYS, U. A; CASTRO, P. T. A; MIRANDA, M. P. S. Mineração em Geossistemas Ferruginosos e Questões de Geoética: o Caso do Rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais, Brasil. **CONFINS**, Paris, v. 40, p. 1, 2019.

SAUSEN NETTO, A. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra: abordagens determinísticas e probabilística**. 89 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

SANDRONI, S.S; SAYÃO, A.S.F. The Use of Relative Probability of Failure in the Design of Open Pit Mine Slopes. **Innovative Mine Design for the 21st Century,** Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 21-24. 1993.

SANTOS, D. A. M. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro**. 9 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SAYÃO, A. F; SANDRONI, S. S; FONTOURA, S.A.B; RIBEIRO R.C.H. Considerations on the Probability of Failure of Mine Slopes. **Soils and Rocks**, ABMS, Vol. 35 (N. 1), pp. 31-37. 2012. DOI:10.28927/SR.351031.

SETEC. Setor Técnico-Científico. **Laudo de Perícia Criminal Federal nº 1070/2019**. Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais. MJSP. Belo Horizonte, 2019. 207p. Disponível em <https://politica.estadao.com.br/blogs/faustomacedo/wp-content/uploads/sitespf_mg_assinado-2.pdf.>Acessado em 14/05/2021.

SILVA, W. P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson**. 120 f. Dissertação

(Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2454>.

SILVA, M. J. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite Geral**. Dissertação (Mestrado Integrado em engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SILVA, F. M. **Avaliação Probabilística da Estabilidade de uma Barragem de Rejeitos**. Rio de Janeiro. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/56899/56899.PDF. Acesso em: 12 ago. 2023

SILVA, B.W.G; SOUSA, T.F.P. **Estudo do Efeito do Truncamento dos Parâmetros de Entrada na Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília. Brasília, DF, 93 p. 2017.

SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO – SIGBM. **Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração - Público**. Agência Nacional de Mineração. 2022. [Online]. Disponível em: https://app.anm.gov.br/Sigbm/publico. Acesso em: 12 ago. 2023.

SOUSA, T.F.P. **Abordagem Monte Carlo para a Análise Probabilística da Estabilidade de Taludes Durante Rebaixamento Rápido de Reservatório**. 2021. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

SUPERINTENDÊNCIA DE PROJETOS PRIORITÁRIOS DO GOVERNO DE MINAS GERAIS (SUPRI). **Parecer único no 0786757/2018**. Licença prévia, de

instalação e de operação concomitantes Mina Córrego do Feijão, 2018. Disponível em: <https://apublica.org/wp-content/uploads/2019/02/item-52-vale-sa-mina-de-corrego-do-feijao-1-2.pdf>. Acesso em 20 de maio de 2022.

SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. **Géotechnique**, v. 17: p. 11-26. 1967. https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11.

SPENCER, E. Thrust line criterion in embankment stability analysis. **Géotechnique**, v. 23, n. 1, p. 85-100. 1973. https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.1.85.

THOMPSON, F; OLIVEIRA, B.C; CORDEIRO, M.C; MAIS, B.P; RANGEL, T.P; PAZ, P. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Sci. Total Enviroment**, v. 705, 2020. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135914.

TORRES FILHO, R. J. A.; ANDRADE, V. C. **Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas na estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso**. 2015. 83 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. 7 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1999.

TUV SUD BUREAU. **Auditoria técnica de segurança 2° ciclo 2018 – complexo Paraopeba – Mina Córrego Feijão Barragem I**. Laudo técnico de segurança de barragem. 2018.

TUV SUD BUREAU. GRG – Gestão de Riscos Geotécnicos. **Revisão periódica de segurança de barragem Mina Córrego Feijão** – barragem I. Relatório Técnico. 2017.

UZIELLI, M; LACASSE, S; NADIM F.; PHOON, K. K. Soil Variability Analysis for Geotechnical Practice. In: **2nd International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils**, Singapore. 2006. DOI:10.1201/NOE0415426916.ch3

VALE S. A. **Comunicado de Imprensa**. 2016. Disponível em: http://www.vale.com/hotsite/PT/barragemacidentesamarco/Paginas/entendabarragensrejeito.aspx#:~:text=O%20beneficiamento%20do%20min%C3%A9rio%20consiste,dep%C3%B3sito%20dos%20res%C3%ADduos%20em%20barragens. Acesso em: 05 mai. 2022.

VALE S. A. **Barragens**. 2022. Disponível em http://www.vale.com/brasil/en/business/mining/pages/dams.aspx#:~:text=%E2%80%9CCenterline%E2%80%9D%20dam%20construction%20method,crest%20of%20the%20starter%20dam.. Acesso em: 05 mai. 2022.

VALE S. A. **Comunicado de Imprensa: 28/1/19**. 2019a. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Vale-informa-sobre-bloqueios-de-recursos-e-de-imposicao-de-sancoes-administrativas.aspx (2019). Acesso em: 18/05/2022.

VALE S. A. **Comunicado de Imprensa: 2/3/19.** 2019b. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-informa-sobre-afastamento-temporario-de-executivos.aspx (2019). Acesso em: 05 mai. 2022.

VALE. **Esclarecimentos sobre a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão**. 2019c. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Esclarecimentos-sobre-a-barragem-I-da-Mina-de-Corrego-do-feijao.aspx. Acesso em 20 de maio. de 2022.

VALERIUS, M. B. **Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p. 2014.

VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. Rio de Janeiro. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) -

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35100/35100.PDF. Acesso em: 05 mai. 2022.

VIANA DA FONSECA, A; CORDEIRO, D; MOLINA-GÓMEZ, F; BESENZON, D; FONSECA, A; FERREIRA, C. The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho. **Soils and Rocks**, v. 45, n. 2, April-June, 2022. DOI: https://doi.org/10.28927/SR.2022.001122.

VOGEL, A. Failures of Dams–Challenges to the Present and the Future. In IABSE Work; Helsinki 2013 Safety, Fail. Robustness Large Struct; **International Association for Bridge and Structural Engineering**: Zurich, Switzerland; pp. 178–185. 2013. DOI:10.2749/222137813807018908.

WEI, Z; YIN, G; LI, G; WANG, J.G; WAN, L; SHEN, L. Reinforced terraced fields method for fine tailings disposal. **Mineral Engineering,** v. 22, p. 1053–1059. 2008. DOI:10.1016/j.mineng.2009.03.014

WOLFF, T.F. Probabilistic slope stability in theory and practice, Proceedings, Uncertainty in the geologic environment: From theory to practice, C.D. Shackelford *et al*. (eds.), Madison, WI, pub. **ASCE**, GSP 58, v.2, pp. 419-433. 1996. DOI:10.1139/t02-034.

WU, S. L. H; ZIQIAO, C. X. Z; HAIYONG, C. "Study on the Limit Equilibrium Slice Method considering Characteristics of Inter-slice Normal Forces Distribution: The Improved Spencer Method." **Environmental Earth Sciences,** v. 78, n. 20, p. 1-18, 2019. DOI:10.1007/s12665-019-8621-5

XU, B; WANG, Y. Análise de estabilidade da barragem de rejeitos da mina de ouro de Lingshan sob condições de altura elevada da barragem. **Bull Eng Geol Environ**, v. 74, p. 151–61 2015.

APÊNDICE I - FOSM

Quadro A – Análise feita para freática identificada como REF superfície ruptura não circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA												
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MG|PRICE	**1,022**	**1,026**	**1,021**	**1,025**	**1,013**	**1,024**	**1,017**	**1,021**	**1,022**	**1,019**	**1,017**	**1,009**	**0,937**	**1,021**	**1,012**
FS - SPENCER	**1,025**	**1,029**	**1,025**	**1,029**	**1,021**	**1,028**	**1,023**	**1,024**	**1,025**	**1,030**	**1,024**	**1,011**	**0,941**	**1,030**	**1,013**

Fonte: Autor.

Quadro B – Análise feita para freática identificada como I-01 e superfície ruptura não circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MG|PRICE	**1,045**	**1,043**	**1,046**	**1,046**	**1,043**	**1,044**	**1,042**	**1,038**	**1,048**	**1,045**	**1,044**	**1,032**	**0,958**	**1,047**	**1,029**
FS - SPENCER	**1,046**	**1,046**	**1,048**	**1,050**	**1,044**	**1,045**	**1,042**	**1,040**	**1,047**	**1,045**	**1,043**	**1,034**	**0,956**	**1,050**	**1,033**

Fonte: Autor.

Quadro C – Análise feita para freática identificada como I-02 e superfície ruptura não circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MG|PRICE	**1,302**	**1,301**	**1,302**	**1,301**	**1,299**	**1,302**	**1,295**	**1,298**	**1,302**	**1,296**	**1,284**	**1,290**	**1,210**	**1,313**	**1,269**
FS - SPENCER	**1,300**	**1,300**	**1,301**	**1,302**	**1,298**	**1,300**	**1,294**	**1,298**	**1,301**	**1,296**	**1,281**	**1,286**	**1,212**	**1,311**	**1,269**

Fonte: Autor.

Quadro D – Análise feita para freática identificada como S-01e superfície ruptura circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,044**	**1,044**	**1,044**	**1,044**	**1,040**	**1,043**	**1,035**	**1,038**	**1,045**	**1,043**	**1,045**	**1,031**	**0,957**	**1,039**	**1,027**
FS - SPENCER	**1,049**	**1,049**	**1,049**	**1,049**	**1,045**	**1,047**	**1,038**	**1,040**	**1,049**	**1,049**	**1,052**	**1,033**	**0,962**	**1,044**	**1,030**

Fonte: Autor.

Quadro E – Análise feita para freática identificada como REF e superfície ruptura circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,065**	**1,065**	**1,065**	**1,065**	**1,065**	**1,065**	**1,059**	**1,060**	**1,065**	**1,065**	**1,069**	**1,053**	**0,977**	**1,064**	**1,049**
FS - SPENCER	**1,068**	**1,068**	**1,068**	**1,068**	**1,070**	**1,067**	**1,061**	**1,061**	**1,067**	**1,068**	**1,074**	**1,055**	**0,983**	**1,068**	**1,051**

Fonte: Autor.

Quadro F – Análise feita para freática identificada como I-01 e superfície ruptura circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,087**	**1,087**	**1,087**	**1,087**	**1,084**	**1,086**	**1,079**	**1,080**	**1,086**	**1,087**	**1,087**	**1,074**	**0,998**	**1,085**	**1,070**
FS - SPENCER	**1,089**	**1,089**	**1,089**	**1,089**	**1,086**	**1,089**	**1,080**	**1,083**	**1,089**	**1,089**	**1,089**	**1,076**	**1,004**	**1,090**	**1,070**

Fonte: Autor.

Quadro G – Análise feita para freática identificada como I-02 e superfície ruptura circular modificando cada parâmetro variável (x) e mantendo as demais variáveis fixas.

PARÂMETRO	ANÁLISE DETERMINÍSTICA	ANÁLISE PROBABILÍSTICA													
	PARÂMETRO MÉDIO	SOLO RESIDUAL			SOLO COMPACTADO			REJEITO COMPACTADO		MINÉRIO ULTRAFINO		REJEITO SATURADO		REJEITO	
		γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	c' - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%	γsat - 10%	Su|(σ'vo) - 10%	γnat - 10%	ϕ - 10%
γnat (KN/m³)	20,00	**18,00**	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
c' (kPa)	16,00	16,00	**14,40**	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
ϕ(graus)	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	19,00	19,00	19,00	19,00	**17,10**	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
c' (kPa)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	**9,00**	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
γnat (KN/m³)	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	**25,20**	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
ϕ (graus)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	**33,30**	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00
γnat (KN/m³)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	**22,50**	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
ϕ (graus)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	**27,00**	30,00	30,00	30,00	30,00
γsat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00	26,00	26,00
Su|(σ'vo)	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	**0,234**	0,260	0,260
γnat (KN/m³)	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	**23,40**	26,00
ϕ (graus)	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	**31,50**
FS - MORGENSTERN-PRICE	**1,302**	**1,302**	**1,302**	**1,302**	**1,302**	**1,302**	**1,302**	**1,296**	**1,302**	**1,302**	**1,306**	**1,287**	**1,206**	**1,312**	**1,251**
FS - SPENCER	**1,310**	**1,310**	**1,310**	**1,310**	**1,310**	**1,310**	**1,310**	**1,303**	**1,310**	**1,310**	**1,312**	**1,295**	**1,212**	**1,316**	**1,253**

Fonte: Autor.

Quadro H - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática REF considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,026	-0,004	0,002	7,84E-06	0,05
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,021	0,001	-0,001	6,40E-05	0,37
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,025	-0,003	0,001	1,52E-05	0,09
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,013	0,009	-0,005	3,97E-05	0,23
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,024	-0,002	0,002	2,56E-04	1,50
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,017	0,005	-0,002	4,23E-05	0,25
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,021	0,001	0,000	4,90E-07	0,00
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,022	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,019	0,003	-0,001	4,41E-06	0,03
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,017	0,005	-0,002	4,23E-05	0,25
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,009	0,013	-0,005	1,69E-04	0,99
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,937	0,085	-3,269	1,63E-02	95,25
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,021	0,001	0,000	1,00E-06	0,01
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,012	0,010	-0,003	1,69E-04	0,99

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,017	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,131	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,022	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,168	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,4331	1/2,31

Fonte: Autor.

Quadro I - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática S-01 considerando o método Spencer e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,006	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,006	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,006	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,000	0,006	-0,003	1,76E-05	0,11
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,005	0,001	-0,001	6,40E-05	0,39
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,000	0,006	-0,002	6,08E-05	0,37
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,002	0,004	-0,001	7,84E-06	0,05
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,006	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,006	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,004	0,002	-0,001	6,76E-06	0,04
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	0,995	0,011	-0,004	1,21E-04	0,74
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,922	0,084	-3,231	1,59E-02	97,48
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,001	0,005	-0,002	2,50E-05	0,15
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	0,998	0,008	-0,002	1,08E-04	0,66

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,016	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,128	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,006	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,047	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,481251	1/2,08

Fonte: Autor.

Quadro J - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática REF considerando o método Spencer e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,029	-0,004	0,002	7,84E-06	0,05
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,025	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,029	-0,004	0,001	2,70E-05	0,16
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,021	0,004	-0,002	7,84E-06	0,05
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,028	-0,003	0,003	5,76E-04	3,39
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,023	0,002	-0,001	6,76E-06	0,04
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,024	0,001	0,000	4,90E-07	0,00
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,025	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,030	-0,005	0,002	1,23E-05	0,07
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,024	0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,011	0,014	-0,005	1,96E-04	1,15
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,941	0,084	-3,231	1,59E-02	93,50
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,030	-0,005	0,002	2,50E-05	0,15
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,013	0,012	-0,003	2,43E-04	1,43

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,017	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,130	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,025	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,192	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,4239	1/2,36

Fonte: Autor.

Quadro K - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-01 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,043	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,046	-0,001	0,001	6,40E-05	0,36
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,046	-0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,043	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,044	0,001	-0,001	6,40E-05	0,36
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,042	0,003	-0,001	1,52E-05	0,09
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,038	0,007	-0,002	2,40E-05	0,13
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,048	-0,003	0,001	1,52E-05	0,09
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,045	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,044	0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,032	0,013	-0,005	1,69E-04	0,95
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,958	0,087	-3,346	1,70E-02	95,54
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,047	-0,002	0,001	4,00E-06	0,02
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,029	0,016	-0,005	4,33E-04	2,43

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,018	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,134	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,045	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,337	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,368041	1/2,72

Fonte: Autor.

Quadro L - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-01 considerando o método Spencer e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,046	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,048	-0,002	0,001	2,56E-04	1,34
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,050	-0,004	0,001	2,70E-05	0,14
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,044	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,045	0,001	-0,001	6,40E-05	0,34
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,042	0,004	-0,001	2,70E-05	0,14
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,040	0,006	-0,002	1,76E-05	0,09
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,047	-0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,045	0,001	0,000	4,90E-07	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,043	0,003	-0,001	1,52E-05	0,08
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,034	0,012	-0,005	1,44E-04	0,75
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,956	0,090	-3,462	1,82E-02	95,51
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,050	-0,004	0,002	1,60E-05	0,08
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,033	0,013	-0,004	2,86E-04	1,50

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,019	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,138	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,046	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,333	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,369566	1/2,70

Fonte: Autor.

Quadro M - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-02 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,301	0,001	-0,001	4,90E-07	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,301	0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,299	0,003	-0,002	4,41E-06	0,02
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,295	0,007	-0,002	8,28E-05	0,38
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,298	0,004	-0,001	7,84E-06	0,04
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,296	0,006	-0,002	1,76E-05	0,08
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,284	0,018	-0,006	5,48E-04	2,51
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,290	0,012	-0,005	1,44E-04	0,66
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	1,210	0,092	-3,538	1,90E-02	87,31
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,313	-0,011	0,004	1,21E-04	0,55
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,269	0,033	-0,009	1,84E-03	8,44

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,022	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,148	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,302	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	2,045	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,020435	1/49,02

Fonte: Autor.

Quadro N - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-02 considerando o método Spencer e superfície de ruptura não circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,300	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,301	-0,001	0,001	6,40E-05	0,32
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,302	-0,002	0,001	6,76E-06	0,03
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,298	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,300	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,294	0,006	-0,002	6,08E-05	0,30
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,298	0,002	-0,001	1,96E-06	0,01
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,301	-0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,296	0,004	-0,002	7,84E-06	0,04
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,281	0,019	-0,006	6,10E-04	3,03
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,286	0,014	-0,005	1,96E-04	0,97
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	1,212	0,088	-3,385	1,74E-02	86,60
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,311	-0,011	0,004	1,21E-04	0,60
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,269	0,031	-0,009	1,62E-03	8,07

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,020	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,142	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,300	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	2,115	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,019216	1/58,14

Fonte: Autor.

Quadro O - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática S-01 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,044	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,044	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,044	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,040	0,004	-0,002	7,84E-06	0,04
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,043	0,001	-0,001	6,40E-05	0,36
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,035	0,009	-0,003	1,37E-04	0,76
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,038	0,006	-0,002	1,76E-05	0,10
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,045	-0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,043	0,001	0,000	4,90E-07	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,045	-0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,031	0,013	-0,005	1,69E-04	0,94
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,957	0,087	-3,346	1,70E-02	94,91
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,039	0,005	-0,002	2,50E-05	0,14
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,027	0,017	-0,005	4,88E-04	2,72

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,018	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,134	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,044	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,328	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,371275	1/2,70

Fonte: Autor.

Quadro P - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática S-01 considerando o método Spencer e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,049	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,049	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,049	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,045	0,004	-0,002	7,84E-06	0,04
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,047	0,002	-0,002	2,56E-04	1,39
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,038	0,011	-0,004	2,04E-04	1,11
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,040	0,009	-0,003	3,97E-05	0,22
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,049	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,049	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,052	-0,003	0,001	1,52E-05	0,08
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,033	0,016	-0,006	2,56E-04	1,39
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,962	0,087	-3,346	1,70E-02	92,33
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,044	0,005	-0,002	2,50E-05	0,14
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,030	0,019	-0,005	6,10E-04	3,31

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,018	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,136	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,049	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,361	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,359126	1/2,78

Fonte: Autor.

Quadro Q - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática REF considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,059	0,006	-0,002	6,08E-05	0,34
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,060	0,005	-0,002	1,22E-05	0,07
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,065	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,069	-0,004	0,001	2,70E-05	0,15
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,053	0,012	-0,005	1,44E-04	0,80
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,977	0,088	-3,385	1,74E-02	96,26
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,064	0,001	0,000	1,00E-06	0,01
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,049	0,016	-0,005	4,33E-04	2,39

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,018	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,135	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,065	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,483	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,3145	1/3,18

Fonte: Autor.

Quadro R - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática REF considerando o método Spencer e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,068	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,068	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,068	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,070	-0,002	0,001	1,96E-06	0,01
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,067	0,001	-0,001	6,40E-05	0,37
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,061	0,007	-0,002	8,28E-05	0,48
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,061	0,007	-0,003	2,40E-05	0,14
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,067	0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,068	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,074	-0,006	0,002	6,08E-05	0,35
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,055	0,013	-0,005	1,69E-04	0,99
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,983	0,085	-3,269	1,63E-02	94,79
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,068	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,051	0,017	-0,005	4,88E-04	2,85
δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).							**V[FS]**	0,017	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).							**σ(FS)**	0,131	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.							**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.							**FS Determinístico**	1,068	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.							**β**	0,519	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.							**PR**	0,3018	1/3,31

Fonte: Autor.

Quadro S - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-01 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,087	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,087	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,087	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,084	0,003	-0,002	4,41E-06	0,02
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,086	0,001	-0,001	6,40E-05	0,34
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,079	0,008	-0,003	1,08E-04	0,58
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,080	0,007	-0,002	2,40E-05	0,13
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,086	0,001	0,000	1,69E-06	0,01
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,087	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,087	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,074	0,013	-0,005	1,69E-04	0,90
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	0,998	0,089	-3,423	1,78E-02	95,38
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,085	0,002	-0,001	4,00E-06	0,02
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,070	0,017	-0,005	4,88E-04	2,61

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,019	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,137	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,087	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,636	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,262243	1/3,81

Fonte: Autor.

Quadro T - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-01 considerando o método Spencer e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,086	0,003	-0,002	4,41E-06	0,03
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,080	0,009	-0,003	1,37E-04	0,80
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,083	0,006	-0,002	1,76E-05	0,10
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,089	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,076	0,013	-0,005	1,69E-04	0,98
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	1,004	0,085	-3,269	1,63E-02	94,54
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,090	-0,001	0,000	1,00E-06	0,01
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,070	0,019	-0,005	6,10E-04	3,55

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,017	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,131	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,089	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	0,679	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,248660	1/4,02

Fonte: Autor.

Quadro U - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-02 considerando o método Morgenstern-Price e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,296	0,006	-0,002	1,76E-05	0,07
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,302	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,306	-0,004	0,001	2,70E-05	0,11
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,287	0,015	-0,006	2,25E-04	0,88
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	1,206	0,096	-3,692	2,07E-02	81,31
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,312	-0,010	0,004	1,00E-04	0,39
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,251	0,051	-0,015	4,40E-03	17,24

δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).	**V[FS]**	0,026	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).	**σ(FS)**	0,160	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.	**MÉTODO**	MORGENSTERN-PRICE	
V[FS] = Variância total do FS.	**FS Determinístico**	1,302	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.	**β**	1,891	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.	**PR**	0,029302	1/34,13

Fonte: Autor.

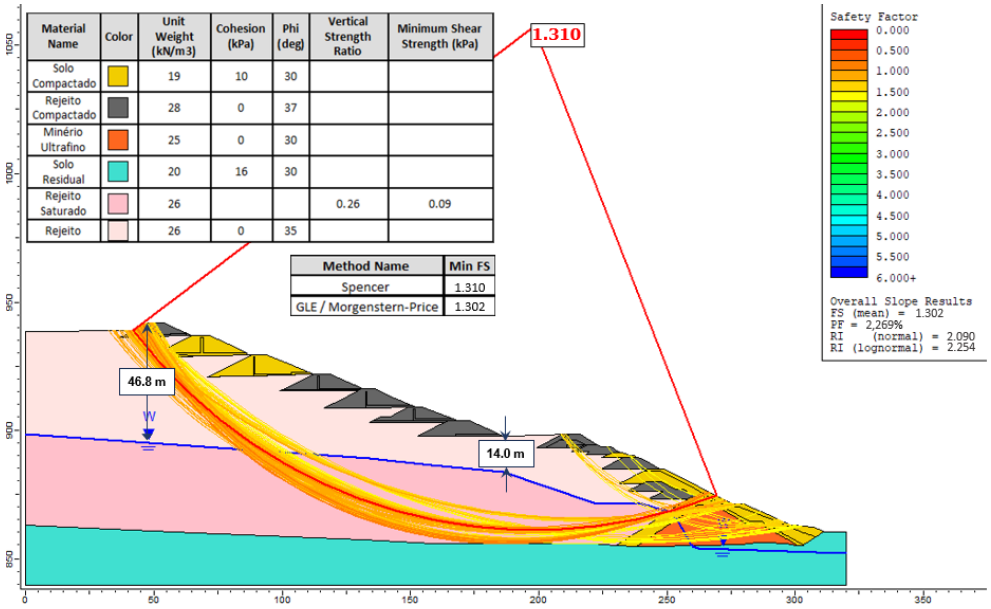
Quadro V - Cálculo da variância do FS pelo método FOSM para freática I-02 considerando o método Spencer e superfície de ruptura circular.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	δXi	V[Xi]	FS (Xi - δXi)	δFSi	(δFSi/δXi)	(δFSi/δXi)².V[Xi]	V[FS] Relativa (%)
Solo Residual	γnat (KN/m³)	20,00	-2,00	1,96	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	16,00	-1,60	163,84	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ(graus)	30,00	-3,00	15,21	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Solo Compactado	γnat (KN/m³)	19,00	-1,90	1,77	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	c' (kPa)	10,00	-1,00	64,00	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Rejeito Compactado	γnat (KN/m³)	28,00	-2,80	3,84	1,303	0,007	-0,003	2,40E-05	0,09
	ϕ (graus)	37,00	-3,70	23,14	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
Minério Ultrafino	γnat (KN/m³)	25,00	-2,50	3,06	1,310	0,000	0,000	0,00E+00	0,00
	ϕ (graus)	30,00	-3,00	15,21	1,312	-0,002	0,001	6,76E-06	0,02
Rejeito Saturado	γsat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,295	0,015	-0,006	2,25E-04	0,82
	Su|(σ'vo)	0,260	-0,026	0,00	1,212	0,098	-3,769	2,16E-02	78,89
Rejeito	γnat (KN/m³)	26,00	-2,60	6,76	1,316	-0,006	0,002	3,60E-05	0,13
	ϕ (graus)	35,00	-3,50	20,70	1,253	0,057	-0,016	5,49E-03	20,05
δXi = Variação da média das variáveis (-10% do valor da média).							**V[FS]**	0,027	100,00
δFSi = Variação do FS (Diferença entre FS determinístico e o FS obtido após a variação).							**σ(FS)**	0,166	
V[Xi] = Variância da média das variáveis.							**MÉTODO**	SPENCER	
V[FS] = Variância total do FS.							**FS Determinístico**	1,310	
σ(FS) = Desvio padrão da variância total do FS.							**β**	1,873	
β = Índice de Confiabilidade | PR = Probabilidade de Ruptura.							**PR**	0,030530	1/34,13

Fonte: Autor.

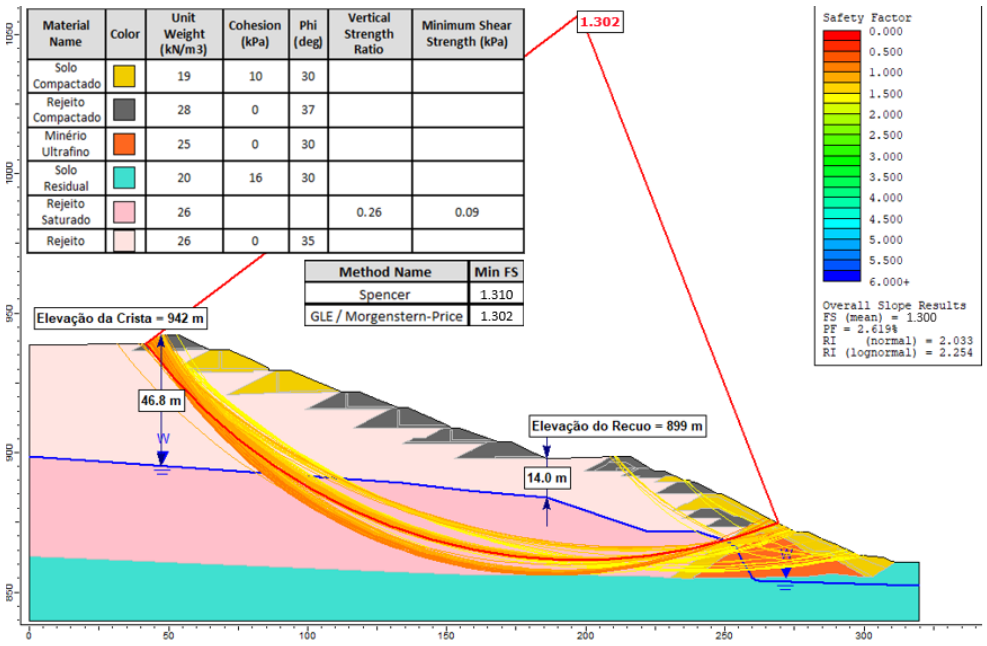
APÊNDICE II – MONTE CARLO

Figura A - Resultado do método de Monte Carlo – I-02¹ (Superfície circular e Spencer).



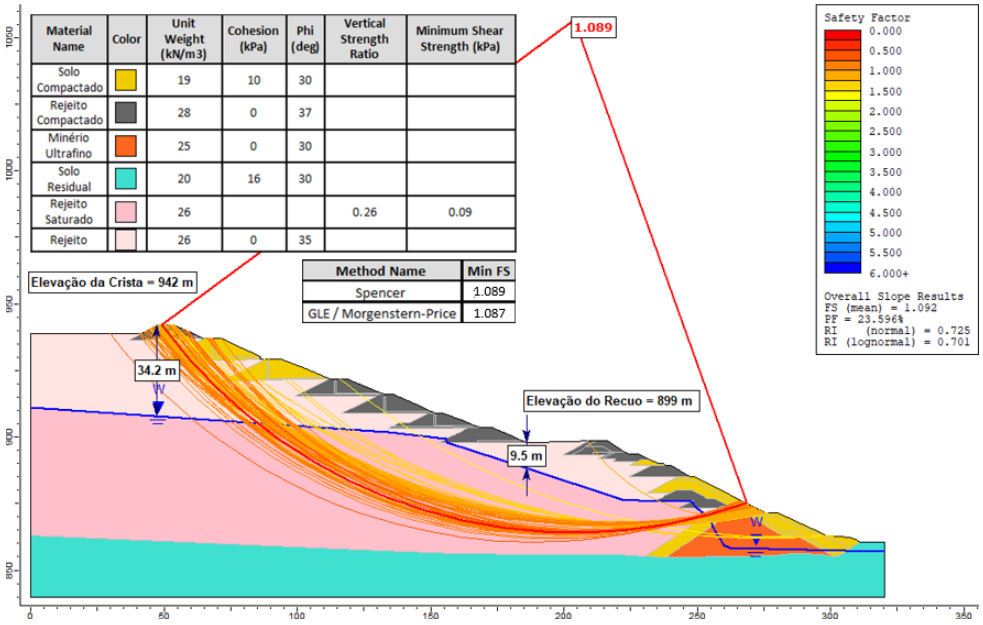
Fonte: Autor.

Figura B - Resultado do método de Monte Carlo – I-02¹ (Superfície circular e Morgenstern - Price).



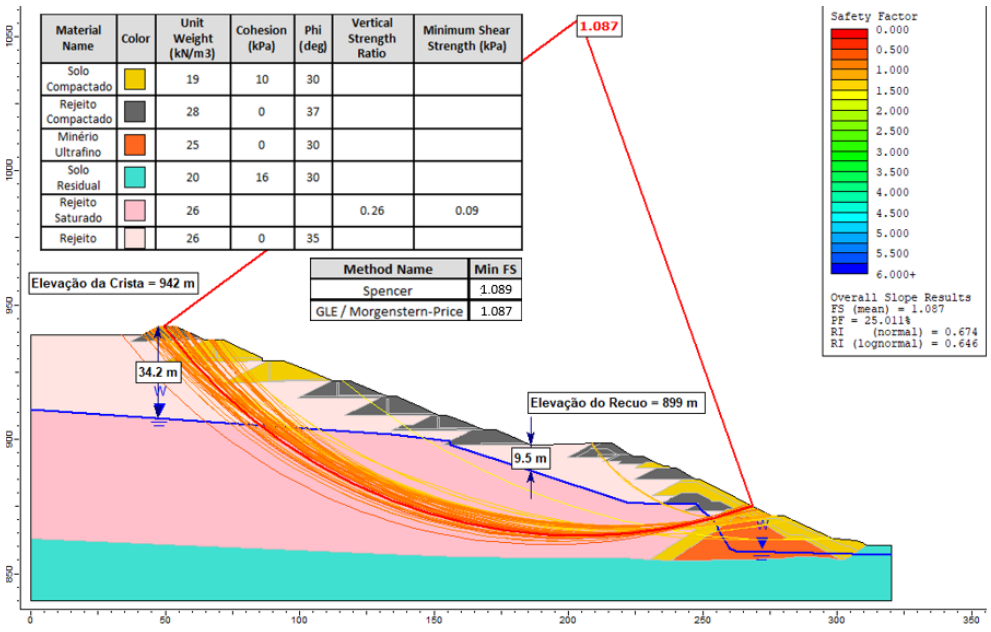
Fonte: Autor.

Figura C - Resultado do método de Monte Carlo – I-01 (Superfície circular e Spencer).



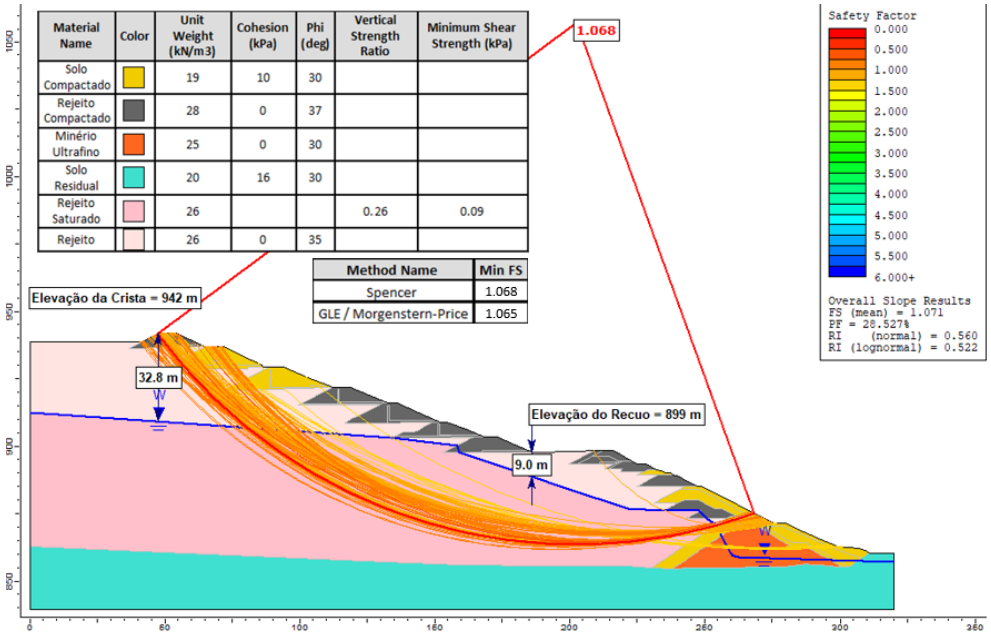
Fonte: Autor.

Figura D - Resultado do método de Monte Carlo – I-01 (Superfície circular e Morgenstern - Price).



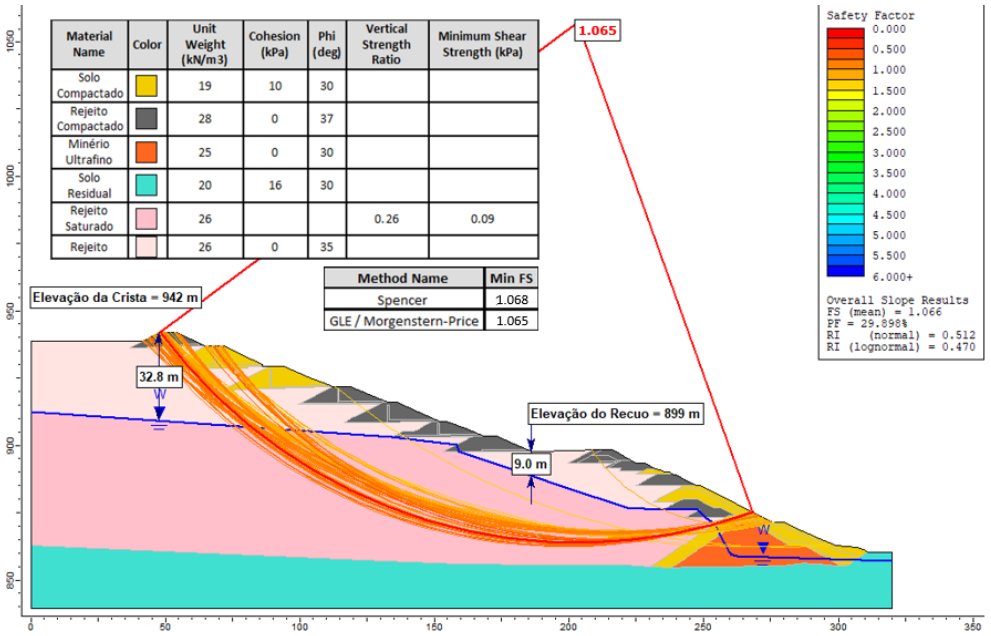
Fonte: Autor.

Figura E - Resultado do método de Monte Carlo – REF (Superfície circular e Spencer).



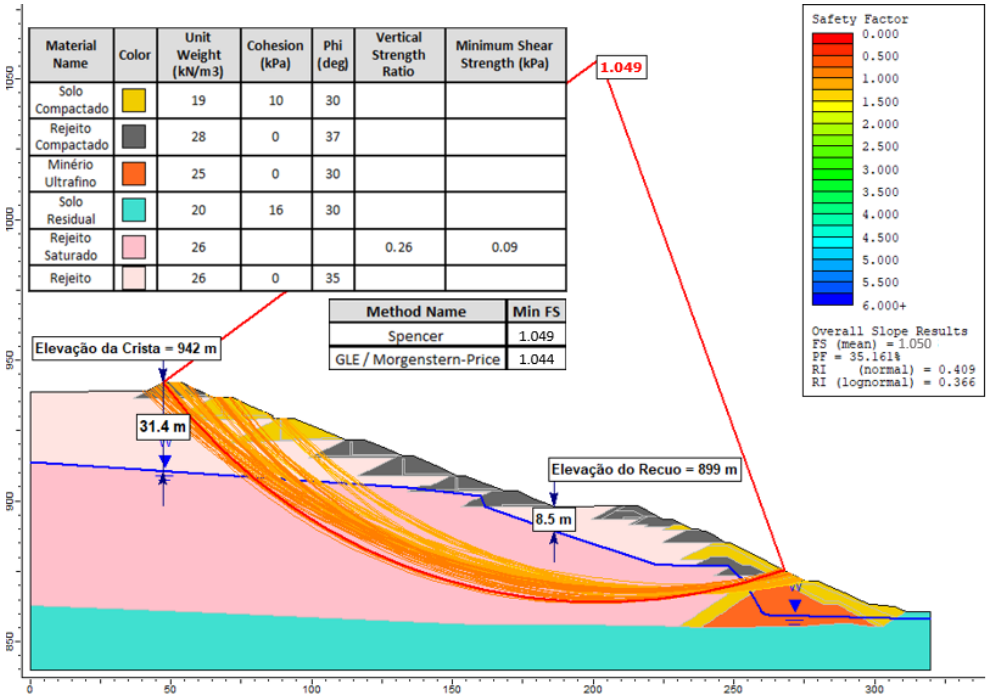
Fonte: Autor.

Figura F - Resultado do método de Monte Carlo – REF (Superfície circular e Morgenstern - Price).



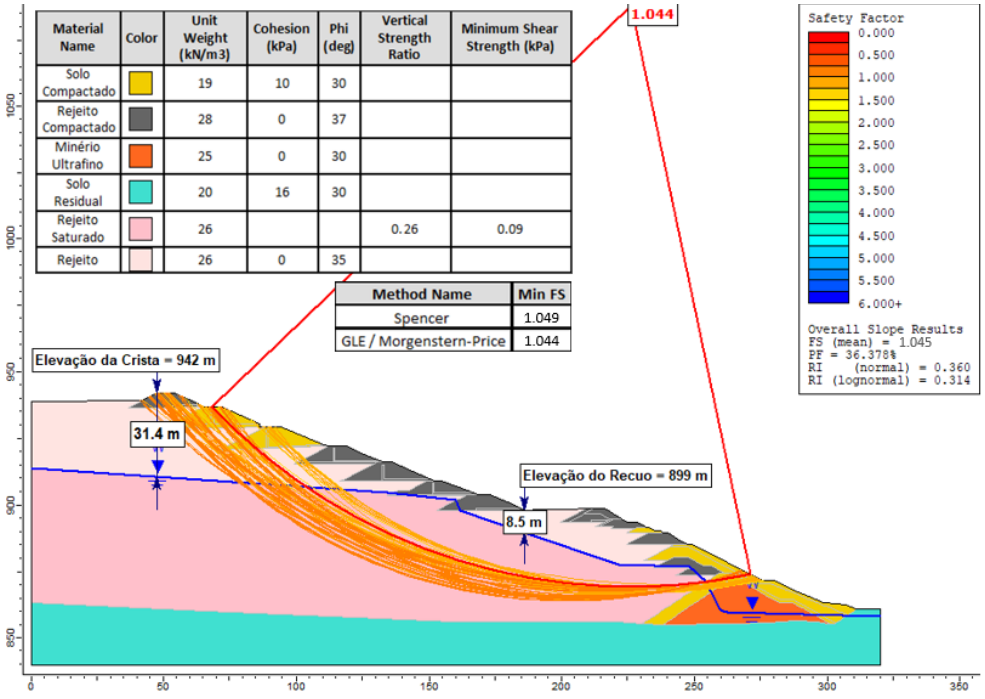
Fonte: Autor.

Figura G - Resultado do método de Monte Carlo – S-01 (Superfície circular e Spencer).



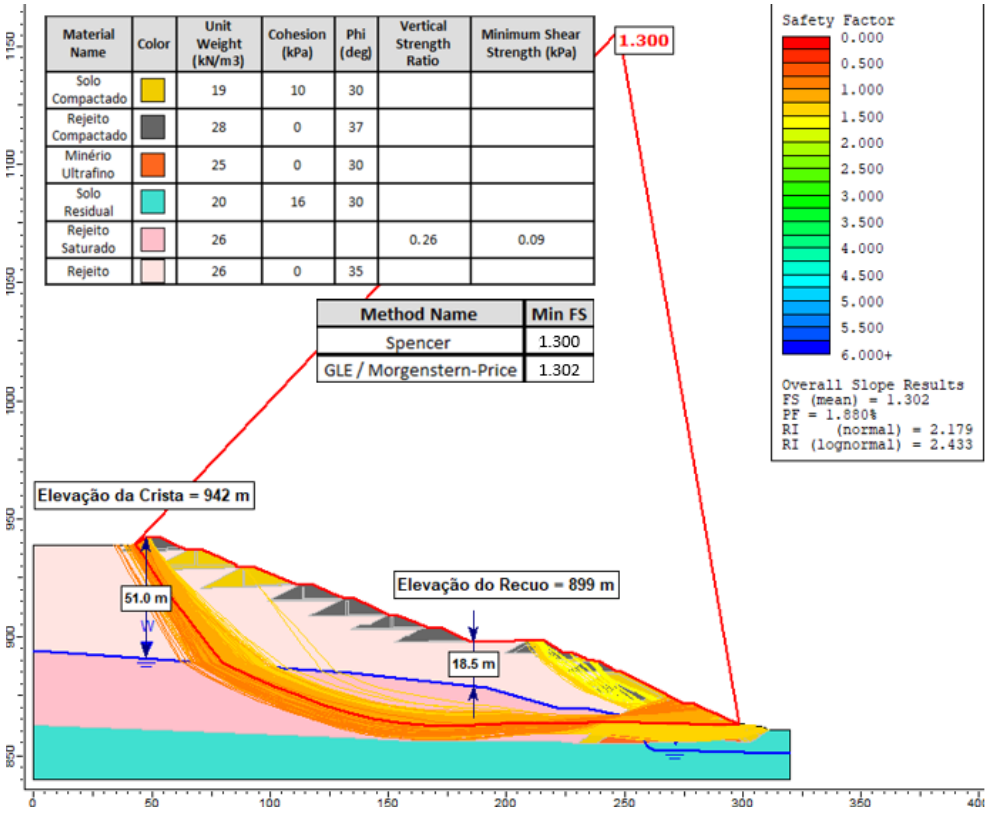
Fonte: Autor.

Figura H - Resultado do método de Monte Carlo – S-01 (Superfície circular e Morgenstern - Price).



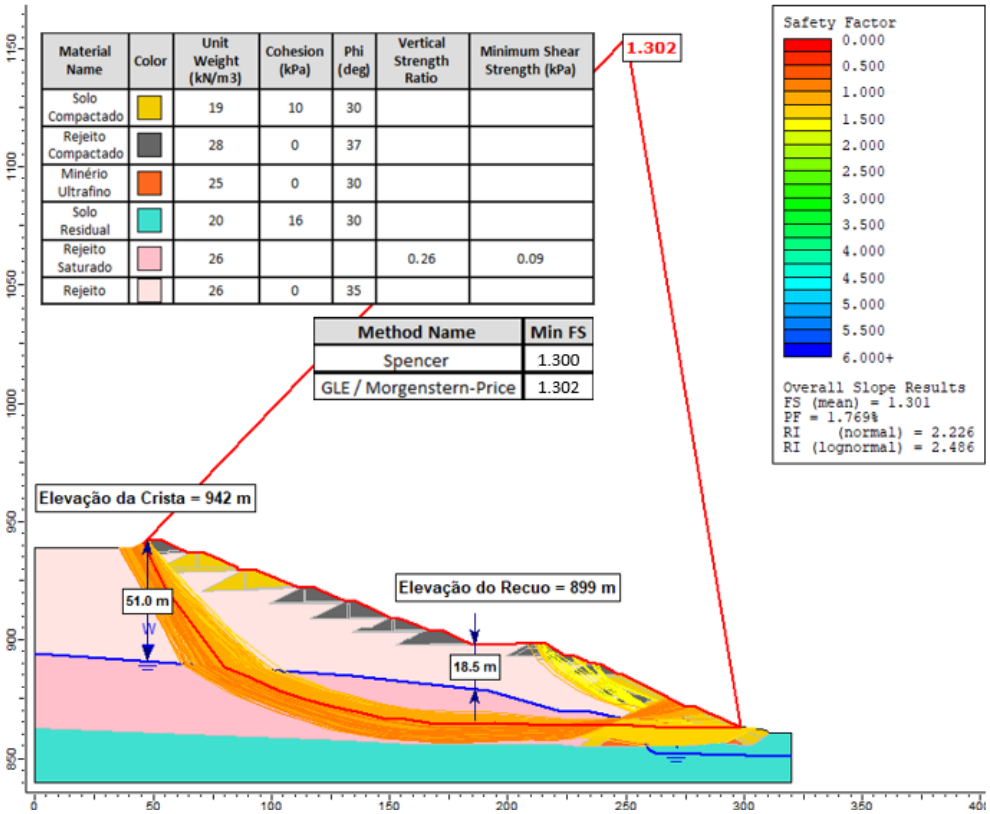
Fonte: Autor.

Figura I - Resultado do método de Monte Carlo – I-02² (Superfície não circular e Spencer).



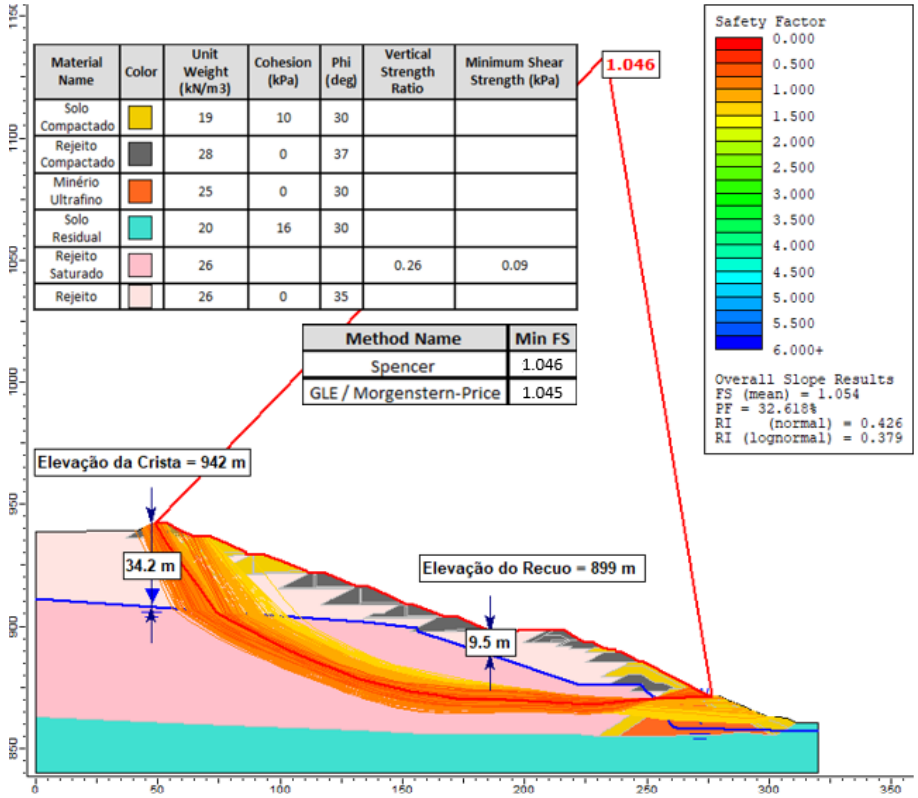
Fonte: Autor.

Figura J - Resultado do método de Monte Carlo – I-02² (Superfície não circular e Morgenstern - Price).



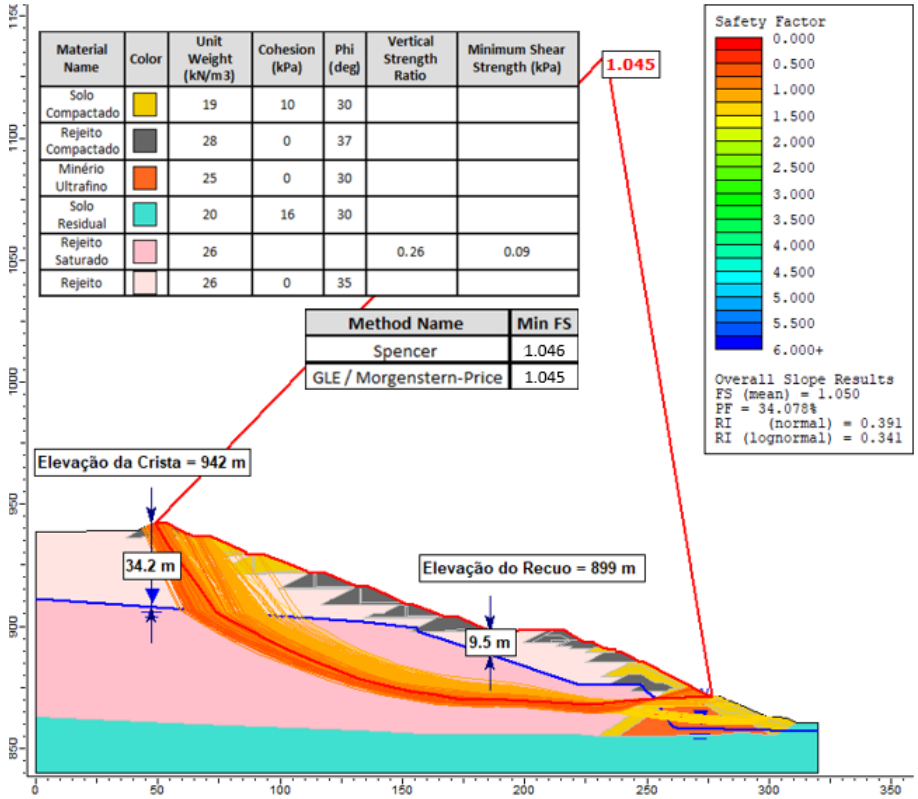
Fonte: Autor.

Figura K - Resultado do método de Monte Carlo – I-01 (Superfície não circular e Spencer).



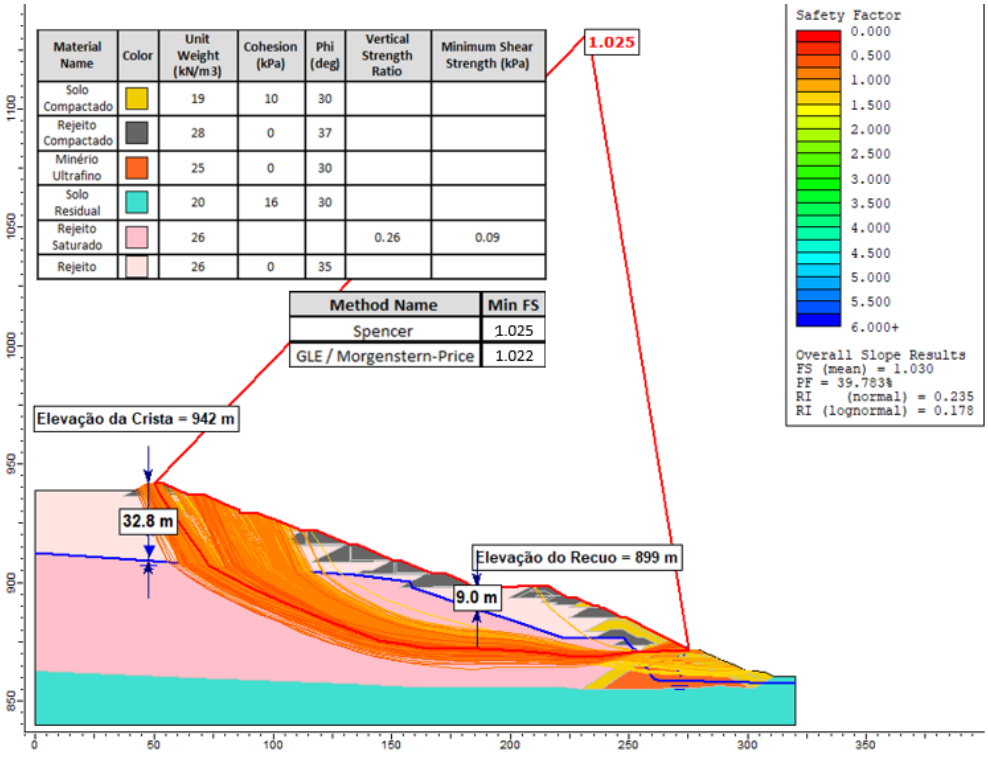
Fonte: Autor.

Figura L - Resultado do método de Monte Carlo – I-01 (Superfície não circular e Morgenstern - Price).



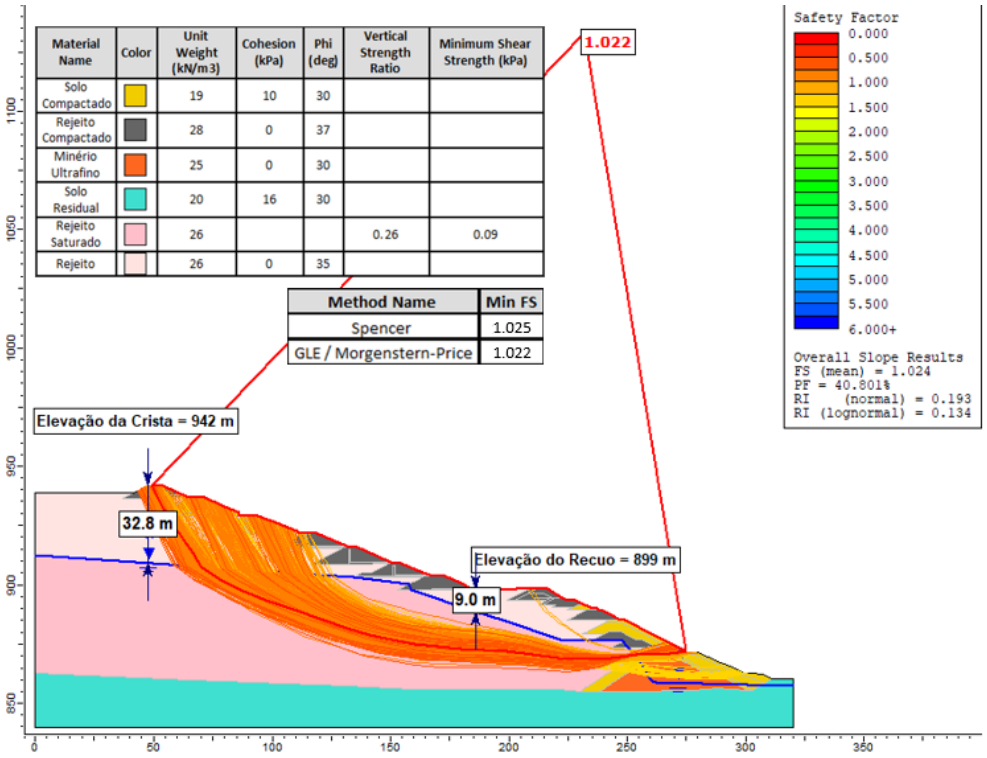
Fonte: Autor.

Figura M - Resultado do método de Monte Carlo – REF (Superfície não circular e Spencer).



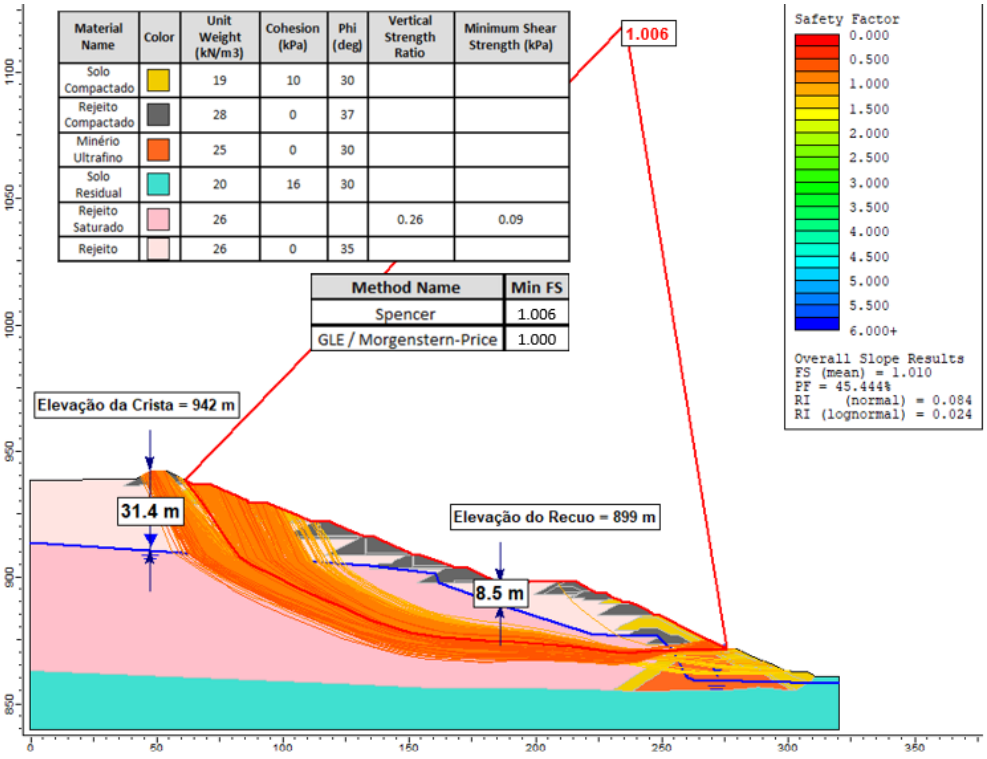
Fonte: Autor.

Figura N - Resultado do método de Monte Carlo – REF (Superfície não circular e Morgenstern - Price).



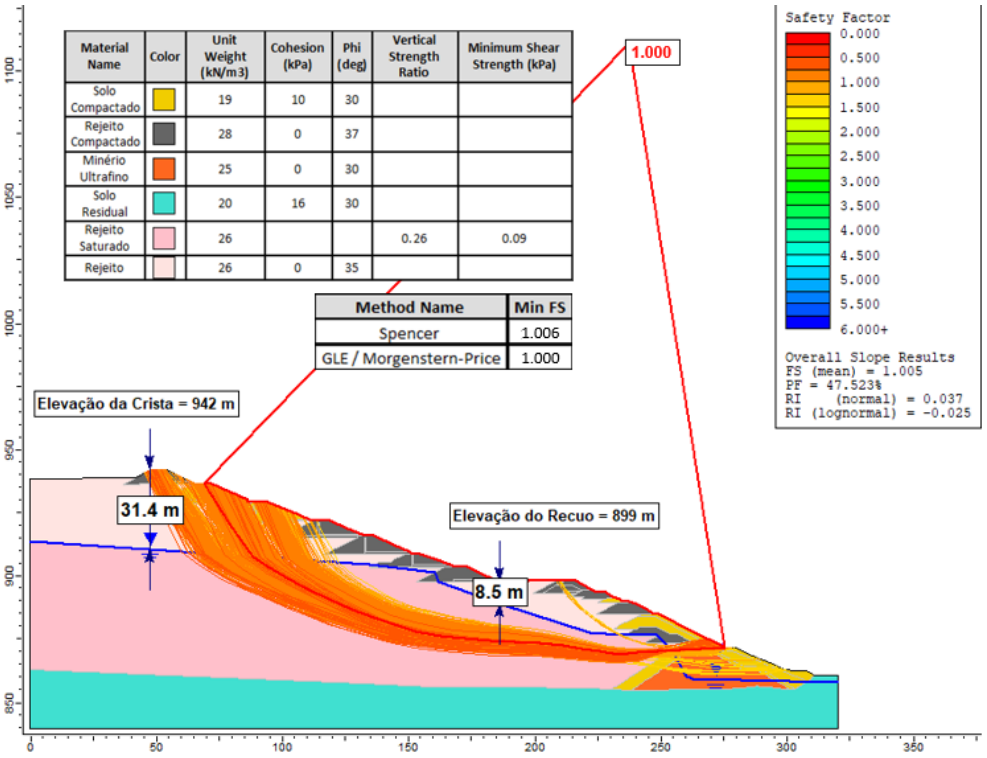
Fonte: Autor.

Figura O - Resultado do método de Monte Carlo – S-01 (Superfície não circular e Spencer).



Fonte: Autor.

Figura P - Resultado do método de Monte Carlo – S-01 (Superfície não circular e Morgenstern - Price).



Fonte: Autor.