

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

CAMPUS ARACAJU

DIREÇÃO DE ENSINO

COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

DENISSON RODRIGO BISPO SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE
MONTANTE E JUSANTE DA BARRAGEM DO RIO POXIM**

MONOGRAFIA

ARACAJU

2021

DENISSON RODRIGO BISPO SANTOS

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE
MONTANTE E JUSANTE DA BARRAGEM DO RIO POXIM**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientadora: Prof. M.Sc. Andréa Santana
Teixeira Lins.

ARACAJU

2021

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Denisson Rodrigo Bispo

S237s Simulação numérica da análise da estabilidade dos taludes de
montante e jusante da barragem do rio Poxim. / Denisson Rodrigo Bispo
Santos. – Aracaju, 2021.

55 f. : il.

Orientadora: Profª. Ma. Andréa Santana Teixeira Lins.
Monografia (Graduação – Bacharelado em Engenharia Civil.) – Instituto
Federal de Sergipe, 2021.

1. Barragem de terra. 2. Modelagem numérica. 3. Análise de
estabilidade. 4. Rio Poxim. 5. Prejuízo ambiental. 6. Software Geo5. 7.
Software OptumG2. I. Lins, Andréa Santana Teixeira. II. Título.

CDU 626.18(81)

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 198

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DE
MONTANTE E JUSANTE DA BARRAGEM DO RIO POXIM**

DENISSON RODRIGO BISPO SANTOS

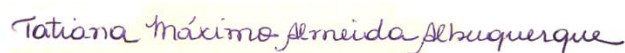
Esta monografia foi apresentada às 19 horas e 45 minutos do dia 08 de setembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof^a. M.Sc. Louise Francisca Sampaio
Brandão

(IFS - Campus Aracaju)



Prof^a. Dra. Tatiana Máximo Almeida
Albuquerque

(IFS - Campus Aracaju)



Prof^a. M.Sc. Andrea Santana Teixeira Lins
(IFS - Campus Aracaju)

Orientadora



Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS - Campus Aracaju)

Coordenador da COEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me capacitado, me dado forças e motivos para continuar e seguir em frente mesmo diante das inúmeras dificuldades.

Agradeço aos meus pais, Wesley e Márcia, e a minha irmã, Débora, pelo suporte e por me ensinarem princípios e valores que me tornaram uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço aos meus amigos, Thalisson e Vancine, por sempre me ajudarem e me incentivarem a não desistir.

Agradeço a minha namorada, amiga e companheira, Stéfanny Bruna, por todo carinho e suporte emocional que me deu, sempre me motivando e me apoiando em todos os momentos.

Agradeço aos colegas, Daniel e Matheus, pelo apoio e ajuda durante a realização deste trabalho, principalmente em aprender a utilizar os softwares.

Agradeço ao engenheiro André Delmondes, por se mostrar sempre solícito em atender e ajudar, com informações valiosas para a realização deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a minha orientadora Prof. M. Sc. Andrea Santana Teixeira Lins por ter me proporcionado tamanho aprendizado bem como por ter me aturado durante este período de desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado, do fundo do meu coração, por todo empenho e por acreditar que eu era capaz.

A todos, o meu respeito e a minha gratidão, pois sem vocês nada disso seria possível.

RESUMO

SANTOS, Denisson Rodrigo Bispo. **Simulação numérica da análise da estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem do rio Poxim**. 55 folhas. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

Barragens são obras que têm por objetivo represar água para diversas finalidades, apresentando elevado risco associado à sua ruptura. O monitoramento contínuo deste tipo de obra, principalmente às de terra, busca conhecer o real comportamento da sua estrutura e realizar em tempo hábil as correções necessárias. No presente estudo foi realizada uma modelagem numérica da seção instrumentada E50 da barragem do rio Poxim, localizada no município de São Cristóvão/SE. Utilizando os softwares Geo5 e OptumG2 foram feitas análises de estabilidade para os taludes de montante (fase de final de construção e de operação) e de jusante. Os resultados obtidos dessas análises foram comparados entre si, aplicando os métodos de Fellenius, Bishop, Morgenstern-Price e MEF. Os fatores de segurança, para ambos os taludes, não apresentaram grandes divergências, com variação máxima de 2,14% entre eles. Também foi realizada uma análise comparativa do fator de segurança para o talude de jusante obtido pelo método de Morgenstern-Price, dado pelo Geo5, com o fator de segurança apresentado no RMA 21, emitido pela empresa de consultoria contratada pelo órgão fiscalizador da barragem do rio Poxim. Nesse caso, a diferença foi de 10,58%, devido a limitação do Geo5. Contudo, todos os fatores de segurança obtidos pelas simulações numéricas realizadas neste estudo estão acima dos valores mínimos recomendados pela literatura. O monitoramento contínuo de barragens de terra, dado pelo acompanhamento dos seus instrumentos e análise de estabilidade de seus taludes, é imprescindível para garantir a segurança deste tipo de obra geotécnica, evitando acidentes com perdas de vida ou prejuízos ambientais.

Palavras chave: Barragens de terra. Modelagem numérica. Análise de estabilidade.

ABSTRACT

SANTOS, Denisson Rodrigo Bispo. **Numerical simulation of the stability analysis of the upstream and downstream of the Poxim river dam**. 55 sheets. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

Dams are works whose objective is to dam water for various purposes, presenting a high risk associated with its rupture. The continuous monitoring of this type of work, especially on earth, seeks to know the actual behavior of its structure and make the necessary corrections in a timely manner. In the present study, a numerical modeling of the instrumented section E50 of the Poxim river dam, located in the municipality of São Cristóvão/SE, was performed. Using Geo5 and OptumG2 software, stability analyzes were performed for the upstream slopes (final phase of construction and operation) and downstream. The results obtained from these analyzes were compared with each other, applying the methods of Fellenius, Bishop, Morgenstern-Price and MEF. The safety factors for both slopes did not show great divergences, with a maximum variation of 2.14% between them. A comparative analysis of the safety factor for the downstream slope obtained by the Morgenstern-Price method, given by Geo5, with the safety factor presented in RMA 21, issued by the consulting company hired by the river dam inspection body, was also carried out. Poxim. In this case, the difference was 10.58%, due to the limitation of Geo5. However, all safety factors recovered by numerical simulations performed in this study are above the values specified in the literature. The continuous monitoring of earth dams, given by monitoring their instruments and analyzing the stability of their slopes, is essential to ensure the safety of this type of geotechnical work, preventing accidents with loss of life or environmental damages.

Keywords: Earth dams. Numerical modeling. Stability analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de aterro hidráulico.....	14
Figura 2 – Barragem de concreto em arco.....	16
Figura 3 – Barragem de enrocamento.....	17
Figura 4 – Barragem de terra.....	18
Figura 5 – Classificação final da barragem.....	19
Figura 6 – Piezômetro do tipo Casagrande.....	21
Figura 7 – Extensômetros de haste.....	22
Figura 8 – Placas de Recalque.....	23
Figura 9 – Localização da Barragem Jaime Umbelino de Souza.....	27
Figura 10 – Vista superior da barragem do rio Poxim.....	28
Figura 11 – Coordenadas dos pontos e localização das interfaces no talude de Jusante.....	30
Figura 12 – Coordenadas dos pontos e localização das interfaces no talude de montante (final de construção).....	31
Figura 13 – Coordenadas e localização do nível freático a 27,7 metros.....	31
Figura 14 – Parâmetros do solo e representação gráfica da geometria.....	32
Figura 15 – Coordenadas e localização dos pontos na seção do talude de jusante.....	34
Figura 16 – Coordenadas e localização dos pontos na seção do talude de montante (final de construção).....	34
Figura 17 – Coordenadas e localização do nível freático a 27,7 metros.....	35
Figura 18 – Parâmetros do Solo.....	35
Figura 19 – Parâmetros geotécnicos para areias e solos arenosos.....	36
Figura 20 – Parâmetros do solo exibidos pelo OptumG2.....	36
Figura 21 – Corte transversal da seção instrumentada E50.....	37
Figura 22 – Coeficientes de permeabilidade adotados na seção instrumentada E50.....	37
Figura 23 – Configurações do Geo5 para execução das análises.....	38
Figura 24 – Configurações do OptumG2 para execução das análises.....	39
Figura 25 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.....	39
Figura 26 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.....	40
Figura 27 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.....	40

Figura 28 – Fatores de segurança limite do talude de montante (final de construção).....	41
Figura 29 – Provável superfície de ruptura no talude de montante (final de construção).....	42
Figura 30 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.....	42
Figura 31 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.....	43
Figura 32 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.....	43
Figura 33 – Fatores de segurança limite do talude de montante (fase de operação)...	44
Figura 34 – Provável superfície de ruptura no talude de montante (fase de operação).....	45
Figura 35 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.....	45
Figura 36 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.....	46
Figura 37 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.....	46
Figura 38 – Fatores de segurança limite do talude de jusante.....	47
Figura 39 – Provável superfície de ruptura no talude de jusante.....	47
Figura 40 – Análise da estabilidade pelo método de Morgenstern-Price (GeoStudio).	48
Figura 41 – Fatores de segurança mínimos.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese das análises realizadas nesse estudo.....	48
--	----

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional de Águas
φ	Ângulo de atrito interno
η	Coeficiente de Poisson
c	Coesão do solo
F.S.	Fator de segurança
MPa	Megapascal
MEF	Método dos elementos finitos
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
E	Módulo de elasticidade
PR	Período de retorno
γ_{nat}	Peso específico natural do solo
γ_{sat}	Peso específico saturado
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
%	Por cento
Km	Quilômetro
Km ²	Quilômetro quadrado
kN/m ³	Quilonewton por metro cúbico
kPa	Quilopascal
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
t/m ²	Tonelada por metro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 TIPOS DE BARRAGENS.....	14
2.1.1 Barragens de Aterro Hidráulico.....	14
2.1.2 Barragens de Concreto.....	15
2.1.2.1 Barragens de Concreto em Gravidade.....	15
2.1.2.2 Barragens de Concreto em Arco.....	16
2.1.2.3 Barragens de Concreto com Contrafortes.....	16
2.1.3 Barragens de Terra e/ou Enrocamentos.....	17
2.2 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE TERRA.....	19
2.3 INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA.....	20
2.3.1 Marco de Deslocamento Superficial.....	20
2.3.2 Piezômetros	21
2.3.3 Inclinômetros.....	21
2.3.4 Extensômetros.....	21
2.3.5 Células de Carga.....	22
2.3.6 Placas de Recalque.....	22
2.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	23
2.4.1 Software Geo5.....	23
2.4.2 Software OptumG2	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1 PROPÓSITO	26
3.2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO POXIM.....	26
3.3 MODELAGENS NUMÉRICAS.....	29
3.3.1 Considerações Geo5.....	29
3.3.2 Considerações OptumG2.....	33
4. ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	37
4.1 SEÇÃO INSTRUMENTADA E50.....	37
4.2 CONFIGURAÇÕES DOS SOFTWARES ANTES DAS ANÁLISES.....	38

4.2.1 Geo5.....	38
4.2.2 OptumG2	38
4.3 TALUDE DE MONTANTE (FINAL DE CONSTRUÇÃO).....	39
4.3.1 Resultados apresentados pelo Geo5.....	39
4.3.2 Resultados apresentados pelo OptumG2.....	41
4.4 TALUDE DE MONTANTE (FASE DE OPERAÇÃO).....	42
4.4.1 Resultados apresentados pelo Geo5.....	42
4.4.2 Resultados apresentados pelo OptumG2.....	44
4.5 TALUDE DE JUSANTE.....	45
4.5.1 Resultados apresentados pelo Geo5.....	45
4.5.2 Resultados apresentados pelo OptumG2.....	47
4.5.3 Resultados apresentados pelo RMA 21.....	48
4.6 ANÁLISE COMPARATIVA.....	48
5. CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

Historicamente o ser humano sempre buscou viver próximo a rios e lagos, de forma a garantir sua subsistência e evitar as consequências geradas pelas secas. Pensando nisso, foram desenvolvidas as barragens, inicialmente de forma bem simples e rudimentar e com o objetivo básico de consumo. Entretanto, com o passar do tempo, e com o crescimento populacional, aliado com o avanço tecnológico, tanto de materiais quanto de técnicas construtivas, as barragens passaram a possuir diversas outras funcionalidades, tais como: geração de energia elétrica (hidrelétricas), tornar rios navegáveis especialmente para fins econômicos, controle de cheias com o intuito de evitar enchentes e os seus prejuízos catastróficos, irrigação, criação de animais, abastecimento de água para as cidades, tanto para uso doméstico quanto industrial, lazer, piscicultura, pesquisas, entre outras (SANTOS, 2019).

Barragens são por definição estruturas posicionadas transversalmente a cursos d'água com o intuito de armazenar, acumular ou reter enormes quantidades de água, podendo ser utilizadas para diversos fins, já citados anteriormente. Existem vários tipos de barragem, tais como: barragem de aterro hidráulico (barragem de rejeitos); barragem de concreto que pode ser em gravidade, em abóboda, em arco ou com contrafortes; barragem de aterro em solo, entre outras. Sabe-se que há diferentes aspectos a serem analisados na escolha do tipo de barragem, como a topografia e a geologia do local, a altura da barragem, o tamanho e a localização do vertedouro, entre outros.

As barragens de aterro em solo são subdivididas em barragens de enrocamentos, de terra e/ou mistas. Particularmente abordando as barragens de terra, estas, são estruturas formadas a partir da deposição de solos, provenientes de áreas de empréstimo, nos cursos d'água ou por escavações junto a estes, e posterior compactação com equipamentos adequados. As barragens de terra também devem apresentar características específicas como alta estanqueidade, e rigoroso controle para evitar o "piping", que é quando a percolação da água de montante atinge o talude de jusante, ocasionando a ruptura da barragem.

Visando regulamentar e direcionar o processo de monitoramento das barragens, foi criada a lei N° 12.334/2010, alterada pela lei N° 14.066/2020, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e instituiu o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), que tem

por objetivos principais, estimular a consciência e maior atenção ao monitoramento e segurança de barragens, como também dirimir acidentes e desastres. Essa lei traz em sua redação dois parâmetros de classificação das barragens: o primeiro referente ao risco, podendo ser alto, médio ou baixo, que leva em consideração fatores como o estado de conservação da estrutura da barragem e o tempo em que a mesma foi construída. E, o segundo, referente ao dano potencial associado, um critério que pondera sobretudo a respeito de perdas de vidas humanas, danos e impactos sociais, ambientais e econômicos resultantes de uma possível ruptura da barragem.

Dito isso e sabendo-se que as barragens são, em geral, obras robustas e de grande porte, e apresentam tantos riscos potenciais associados à sua ruptura, segundo Oliveira (2019) é indispensável, e de suma importância, o monitoramento contínuo da estrutura e estabilidade de barragens, que visem contribuir para o bom funcionamento e operação desta ao longo de sua vida útil, utilizando-se para isso a ferramenta da instrumentação.

A instrumentação conjuntamente com a inspeção visual faz parte da auscultação que nada mais é que o conjunto de ações que visam monitorar o comportamento da estrutura da barragem e da fundação, de forma a assegurar suas condições de segurança, validar a coerência dos cálculos de projeto e verificar medidas corretivas necessárias em tempo hábil. Sendo assim, a inspeção visual conta com vistorias periódicas de campo, enquanto a instrumentação utiliza equipamentos como, piezômetros para medir as poropressões e inclinômetros para aferir deslocamentos do corpo da barragem e da fundação, entre outros (FONSECA, 2003).

A tecnologia com o emprego de softwares, que visam estabelecer o comportamento ideal que a estrutura de uma barragem pode apresentar ao longo do tempo, é de suma importância pois confere à auscultação um modelo preciso a ser confrontado com os dados obtidos na instrumentação. Assim sendo, os valores obtidos na instrumentação serão coerentes ou não, baseados nos valores obtidos através desses softwares.

Desta forma, o objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é analisar o comportamento quanto à estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem do Rio Poxim empregando ferramentas computacionais. E, para atingir este objetivo geral, foram fixados os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as metodologias de modelagens adotadas pelas ferramentas computacionais empregadas no estudo;
- Analisar a estabilidade dos seus taludes de montante e jusante realizando a simulação numérica da seção transversal da barragem do Rio Poxim;
- Comparar os resultados da análise da estabilidade dos taludes obtidos pela modelagem computacional com os resultados apresentados no relatório mensal de andamento da barragem, bem como com os valores disponíveis da literatura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Desde os tempos mais remotos o homem necessitou se localizar próximo a rios e lagos para sobreviver. Nesse contexto, iniciam-se a construção de pequenas barragens que visam armazenar e reter grandes quantidades de água para consumo humano e animal. Entretanto, com o avanço tecnológico tanto de materiais quanto de técnicas construtivas, outras barragens foram construídas com finalidades além da subsistência, como para geração de energia elétrica, controle de cheias, dentre outras. Para atender às diferentes finalidades existem diversos tipos de barragens, os quais serão a seguir apresentados.

2.1 TIPOS DE BARRAGENS

Existem vários tipos de barragens, sendo as principais: barragem de aterro hidráulico, barragem de concreto e barragem de terra e/ou enrocamentos.

2.1.1 Barragens de Aterro Hidráulico

As barragens de aterro hidráulico ou barragens de rejeitos são barragens que têm por finalidade o acúmulo de resíduos contaminantes advindos de mineração. Sua construção não se dá de uma única vez, mas sim em etapas sucessivas (Figura 1), inicialmente com a construção do dique de partida e à proporção do acréscimo de volume de rejeitos, são executados alteamentos sucessivos podendo ser utilizado os próprios rejeitos (PIRES, 2016).

Figura 1 – Barragem de aterro hidráulico.



Fonte: Fernandes (2019).

Esse tipo de barragem possui um alto dano potencial associado e elevado risco caso venha ocorrer um colapso na sua estrutura, como pode-se observar nas tragédias recentes com barragens de rejeitos nos municípios de Minas Gerais, Brumadinho e Mariana, onde os impactos ambientais, sociais e econômicos foram catastróficos, sem contar nas inúmeras vidas que foram ceifadas.

2.1.2 Barragens de Concreto

As barragens de concreto possuem a premissa básica de necessitar de ombreiras e fundações constituídos em maciços rochosos. Sua estrutura rígida, composta completamente por concreto, e sua execução pode ser realizada de duas formas. A primeira em concreto armado, onde sua confecção se dá de forma análoga a obras de viadutos, com o emprego de formas, armação e lançamento. E a segunda em concreto rolado, que possui traço atípico, entretanto para a sua compactação utilizam-se de equipamentos comumente utilizados nas construções de barragens de terra (PIRES, 2016).

As barragens de concreto são divididas de acordo com a disposição e a forma da estrutura da barragem. Podendo ser:

- Em gravidade;
- Em Arco;
- Com contrafortes.

2.1.2.1 Barragens de Concreto em Gravidade

As barragens de concreto em gravidade são aquelas construídas em concreto e que através da sua inércia resistem aos esforços atuantes como a tendência ao tombamento provocada pelo empuxo de água.

Em comparação com barragens de terra e enrocamento possui custo mais elevado, pois necessariamente suas fundações e ombreiras precisam estar apoiadas em maciços rochosos, porém são mais resistentes e apresentam menor custo de manutenção (MARANGON, 2004).

2.1.2.2 Barragens de Concreto em Arco

As barragens de concreto em arco segundo Veról (2010) podem apresentar curvatura apenas em planta (Figura 2), como também em planta e perfil (arco duplo ou abóboda). São mais indicadas em vales estreitos o que resulta em estruturas onde a altura é maior que a sua largura, e dessa forma sendo mais facilmente encontradas na Europa, onde seus vales apresentam tais características.

Figura 2 – Barragem de concreto em arco.



Fonte: Grupo Goiás Impermeabilizações (2013).

Apesar de possuírem vantagens como o menor consumo de concreto, em comparação com as demais, as barragens de concreto em arco também apresentam desvantagens como o maior controle tecnológico quanto as armações e formas, visto que a forma de arco não é usual, além de exigirem ombreiras rochosas, uma vez que nesse tipo de barragem o arco favorece a transmissão de todos os esforços para estes elementos.

2.1.2.3 Barragens de Concreto com Contrafortes

Neste tipo de barragem de concreto, com o objetivo de reduzir sua seção transversal e robustez, são empregadas lajes de sustentação, denominadas de contrafortes, que ficam posicionadas a jusante em todo o corpo da barragem (PIRES, 2016).

Entretanto, esse tipo de barragem apresenta algumas peculiaridades como maior controle geológico e maior tratamento com as fundações, uma vez que os

contrafortes estão em contato com o solo em diferentes localizações, e também gera nas fundações uma maior compressão.

2.1.3 Barragens de Terra e/ou Enrocamentos

As barragens de enrocamentos são construídas a partir da deposição de blocos de rocha de variados tamanhos conjuntamente com uma laje de concreto a montante de modo a evitar que a água contida alcance o corpo da barragem, conforme Figura 3. Uma das principais vantagens desse tipo de barragem é que admite taludes mais acentuados devido à elevada resistência apresentada pelos blocos de rocha.

Figura 3 – Barragem de enrocamento.



Fonte: EngWhere (2018).

As barragens de terra são o tipo mais elementar de barragens, pois sua construção não requer o emprego de tanta tecnologia, valendo-se apenas da deposição de solos, advindos de áreas de empréstimo, dos cursos d'água ou por escavações junto a estes, e posterior compactação com equipamentos adequados, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Barragem de terra.



Fonte: Oficina de Textos (s/d).

Esses materiais podem ser areias, siltes ou argilas, mas o mais usual é a argila, pois possui características satisfatórias para esse tipo de barragem, sendo a principal delas a baixa permeabilidade, que é de suma importância para evitar que a percolação da água de montante alcance o talude de jusante propiciando o carreamento de partículas de solo pelo maciço, o chamado “*piping*” e dessa forma ocorra a ruptura da barragem (OLIVEIRA, 2019).

Outra anomalia que deve ser evitada, também segundo Oliveira (2019), é a chamada ruptura por galgamento ou “*overtopping*” que é o transbordamento da barragem devido a uma cheia extraordinária, decorrente de falha de operação dos vertedouros ou ainda em detrimento de falha de projeto.

Com o passar do tempo e com a evolução constante da Geotecnia e da Mecânica dos Solos houve um aprimoramento e melhoria significativa tanto das condições de monitoramento contínuo e segurança das barragens, quanto no prolongamento da sua vida útil.

2.2 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE TERRA

Ao longo dos anos as barragens ganharam altura e robustez, o que aumentou a preocupação e o cuidado em garantir a sua integridade e segurança. Dessa forma, foi criada a lei N° 12.334/2010, alterada pela lei N° 14.066/2020, que a partir do estabelecimento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), visa regulamentar as diretrizes e procedimentos indispensáveis ao monitoramento de barragens desde a fase de planejamento até a sua desativação.

Essa lei também trata da classificação das barragens segundo dois critérios: o risco, que está relacionado com a idade da barragem e com as técnicas construtivas adotadas; e, ao dano potencial associado, que está relacionado aos impactos ambientais, econômicos e sociais provocados pela possível ruptura da barragem, prejudicando principalmente a população à jusante da barragem. Sendo ambos os critérios categorizados em alto, médio ou baixo, a partir da correlação entre risco e dano potencial associado, tem-se a classificação final da barragem, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Classificação final da barragem.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Fonte: ANEEL (2020).

Assim, com base na Figura 1, o enquadramento na categoria A são barragens com risco e dano potencial associado altos e cujas anomalias, para manutenção da sua segurança, requerem ações de curto prazo; na categoria B são barragens com risco ou dano potencial associado altos e cujas anomalias, se existirem, devem ser monitoradas e controladas, enquanto as ações para manutenção de sua segurança podem ser realizadas ao longo do tempo; e, por fim, na categoria C são barragens que apresentam risco e dano potencial associado médio ou baixo, não apresentando anomalias e as existentes não comprometem a segurança da barragem.

Contudo, e sabendo-se dos imensuráveis prejuízos sociais, ambientais, econômicos e de vidas vitimadas por uma possível ruptura da barragem, é de

fundamental importância o monitoramento contínuo da estrutura e estabilidade de barragens, utilizando-se para isso a instrumentação conjuntamente com visitas periódicas a campo (inspeções visuais). Ambos os controles se complementam e são de extrema importância no monitoramento de barragens (Penman et al., 1999 apud TEIXEIRA, 2013).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS DE TERRA

A instrumentação tem como objetivo apresentar informações sobre o comportamento de barragens, contribuindo para o conhecimento e entendimento de seu desempenho e para a manutenção da sua segurança (FUSARO, 2007).

Segundo Murray (1988) apud Teixeira (2013), a instrumentação aplicada em uma barragem não exclui suas potenciais anomalias, no entanto proporciona uma série de situações favoráveis à segurança das mesmas, como a comparação do desempenho calculado em projeto com o de operação, a avaliação de procedimentos corretivos e a colaboração em investigações do comportamento das estruturas da barragem.

Para realizar a instrumentação são utilizados dispositivos que visam coletar e verificar os dados do comportamento dessas estruturas e de suas condições, tanto no que se refere ao seu corpo (estrutura principal), como das fundações e dos dispositivos auxiliares. As grandezas mais importantes que são monitoradas durante o processo construtivo e a vida útil de uma barragem são: deslocamentos, poropressão, recalques, entre outros. A seguir, são apresentados alguns dos instrumentos mais usuais empregados no monitoramento de barragens.

2.3.1 Marco de Deslocamento Superficial

O marco de deslocamento superficial é um marco topográfico instalado na superfície da barragem, e é constituído de uma barra de aço, uma semiesfera que fica localizada na parte superior e um boco de concreto para fixação. Suas leituras são feitas com equipamentos de topografia (estação total), que medem os deslocamentos da barragem a partir de marcos superficiais fixos e indeslocáveis fora do domínio e influência da barragem (FUSARO, 2007; OLIVEIRA, 2019).

2.3.2 Piezômetros

Existem vários tipos de piezômetros, do tipo casagrande de tubo aberto e de tubo fechado, elétrico, elétrico de corda vibrante, pneumático, hidráulico, entre outros, todos com basicamente a mesma funcionalidade a medição das pressões neutras e subpressões em taludes, aterros e fundações.

Segundo Oliveira (2019), os piezômetros do tipo casagrande (Figura 6) são constituídos de um tubo de PVC perfurado na ponta inferior, e revestidos por uma manta geotêxtil, e são inseridos em um furo de sondagem. Estes instrumentos visam a determinação das pressões neutras (poropressões), devido à água, atuantes nos poros dos solos.

Figura 6 – Piezômetro do tipo Casagrande.



Fonte: Wyde (s/d).

2.3.3 Inclínômetros

Os inclinômetros são instrumentos que buscam determinar os perfis de recalque e deslocamentos horizontais, utilizando-se para isso a movimentação de um pescado ou torpedo ao longo do tubo guia. Além do mais, sua instalação pode se dá de três maneiras distintas, horizontal, vertical ou inclinada, sendo a maneira como é efetuada a medição da grandeza o que as diferencia (FONSECA, 2003).

2.3.4 Extensômetros

Os extensômetros são instrumentos utilizados para medição de deslocamentos e deformações no corpo da barragem (Figura 7). Estes instrumentos têm por principal funcionalidade estabelecer os deslocamentos do maciço, tanto de forma qualitativa, quanto quantitativa (FUSARO, 2007).

Fusaro (2007) aponta ainda que o apoio inadequado do relógio comparador da base e o cadastramento equivocado das cotas de ancoragem das hastes são erros recorrentes na instalação e leitura desses instrumentos.

Figura 7 – Extensômetros de haste.



Fonte: Smiderle (2014).

2.3.5 Células de Carga

As células de carga, ou também chamadas células de pressão, são instrumentos que mensuram as tensões totais em maciços, fundações, entre outros. A determinação dessas tensões é obtida através da pressão de um óleo desaerado que preenche completamente uma almofada de aço inoxidável ligada a um transdutor de pressão, o qual permite fazer a leitura da pressão do óleo dentro da célula, que será igual a tensão total induzida pelo solo adjacente (FUSARO, 2007).

2.3.6 Placas de Recalque

As placas de recalque são dispositivos constituídos de placas horizontais que são acopladas a tubos de aço galvanizado, e inseridos em um tubo guia. Essas placas de recalque têm por objetivo determinar deslocamentos verticais sofridos pelo maciço e/ou pela fundação da barragem. A partir das leituras de recalques entre as placas é realizada a leitura do recalque vertical total.

Figura 8 – Placas de recalque.



Fonte: Smiderle (2014).

2.4 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

2.4.1 Software Geo5

O *software* Geo5 foi desenvolvido pela empresa Fine Civil Engineering e conta com um conjunto de programas individuais que versam sobre variadas questões geotécnicas, por exemplo, verificação de fundações, muros, projeto de contenções, encontro de pontes e estabilidade de taludes. Neste último, o *software* Geo5 utiliza de diferentes métodos para determinar o fator de segurança que seja aceitável e garanta a estabilidade do talude analisado, tais como os métodos de Bishop, Fellenius e Morgenstern-Price.

Primeiramente, para dar início a modelagem de uma barragem no *software*, é necessário fornecer ao aplicativo as dimensões do modelo, em metros, e então criar a geometria da seção que será analisada, inserindo as coordenadas de cada ponto e definindo as superfícies dos diferentes tipos de solo, através da opção “interfaces”. Após essa etapa, tem-se a inserção dos parâmetros e características de cada solo, são eles: o peso específico natural do solo (γ_{nat}) e o peso específico saturado (γ_{sat}), ambos em kN/m³; ângulo de atrito interno (ϕ) em graus e, por último, a coesão do solo

(c) expressa em kPa. Para a análise da estabilidade do talude de montante de uma barragem, quando da presença do lençol freático (fase de operação da barragem), será fornecido ao *software* as suas coordenadas empregando a opção “nível freático”. Para analisar a estabilidade desse talude logo após a construção da barragem (antes do enchimento do reservatório) esta opção não é utilizada.

Após executadas as etapas mencionadas, utilizando a opção “atribuir”, como o próprio nome induz, o usuário deve definir qual o tipo de solo para cada interface criada, e dessa forma restará apenas a etapa de análise para ser efetuada, na qual o aplicativo realiza o cálculo da estabilidade através de métodos de equilíbrio limite, tais como: Bishop, Fellenius e Morgstern–Price.

Na etapa de análise, é inserido graficamente a superfície de deslizamento e a partir do método adotado, o software fornecerá o fator de segurança dessa superfície. Entretanto, existe também a opção de o software calcular qual a superfície de ruptura mais crítica, na qual ocorrerá com o menor fator de segurança, e ainda na opção “buscar grelha”, o Geo5 fornece todas as prováveis superfícies de ruptura, com seus respectivos fatores de segurança.

O software pode também apresentar como informações de saída de suas análises os momentos, resistente e de deslizamento; o somatório de forças, ativas e passivas; além das coordenadas do centro da superfície circular de deslizamento mais crítica e o seu respectivo raio.

2.4.2 Software OptumG2

O software OptumG2 por sua vez, foi concebido pela empresa Optum Computacional Engineering e emprega o método dos elementos finitos (MEF), através de diferentes análises, como a tensão inicial, análise limite e redução de resistência.

Inicialmente, o usuário deve desenhar a seção que será analisada pelo software através da opção “linhas”, ou ainda inserindo as coordenadas de cada ponto, assim como no Geo5. Após essa etapa, é necessário escolher os materiais que serão empregados e para isso o OptumG2 possui uma biblioteca com vários materiais predefinidos, além de geogrelhas, placas e conectores.

Escolhido o tipo de material, é preciso inserir os valores característicos de cada tipo de solo, onde além dos dados já mencionados no software Geo5, o OptumG2 também requer a inserção de outros parâmetros do solo, tais como: o módulo de elasticidade (E), em MPa; o coeficiente de Poisson (η), adimensional. Feito isso, e definido um tipo de solo para cada região, é necessário informar ao software quais serão as unidades suporte, as quais não farão parte da análise.

Realizada a análise, o OptumG2 apresenta seus resultados de uma forma diferente do Geo5. Enquanto este último fornece, basicamente, o fator de segurança mais desfavorável, o OptumG2 apresenta dois fatores de segurança limites, o superior e o inferior.

Além disso, o OptumG2 também possui recursos de criar animações com a superfície de ruptura, e a opção de salvar um relatório contendo todas as informações que foram inseridas e os resultados obtidos das análises realizadas.

3. METODOLOGIA

Esta monografia baseia-se em uma pesquisa bibliográfica, descritiva, exploratória e modelagem numérica com a finalidade de analisar um caso de barragem de terra monitorada, avaliando a estabilidade dos seus taludes de montante e jusante empregando métodos computacionais.

3.1 PROPÓSITO

Para a realização da pesquisa bibliográfica foram feitas pesquisas em trabalhos de conclusão de curso, artigos técnicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, notas de aula de universidades e faculdades, os quais foram redigidos e publicados por diversos autores, além de relatórios e manuais de órgãos públicos. A pesquisa bibliográfica foi realizada com o intuito de buscar o embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho.

Para a realização da pesquisa descritiva foi realizada a coleta dos dados da barragem do Poxim, junto ao seu órgão empreendedor, que disponibilizou informações tanto do corpo da barragem, quanto de sua fundação e vertedouro, às quais são pertinentes as características e aspectos construtivos e de monitoramento dessa barragem. Foram também realizadas entrevistas com os profissionais responsáveis pelo monitoramento dessa obra de terra.

Para a realização da pesquisa exploratória foram realizadas inspeções visuais por meio de visitas “in loco” na barragem do Poxim, onde foram feitas vistorias e obtidos dados pertinentes aos instrumentos de monitoramento empregados nessa barragem.

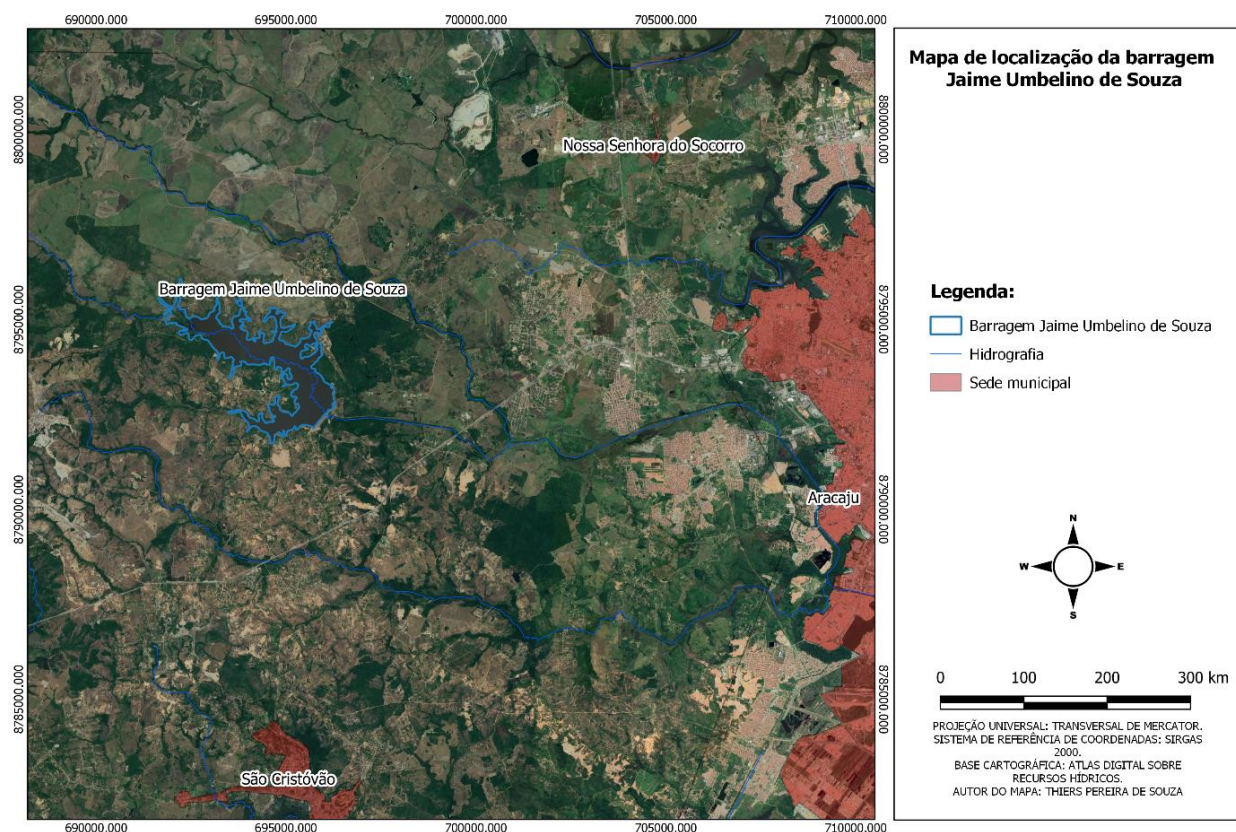
Para a realização da modelagem numérica foram empregados dois softwares disponíveis no mercado, os quais serão apresentados nos próximos itens com maiores detalhes.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO POXIM

A barragem analisada neste trabalho trata-se de uma barragem de terra homogênea, construída no ano de 2012, e denominada barragem Jaime Umbelino de

Souza, popularmente conhecida como barragem do Poxim. Esta obra está localizada no município de São Cristóvão (Figura 9), a 30,2 km da capital Aracaju.

Figura 9 – Localização da Barragem Jaime Umbelino de Souza.



Fonte: SERHMA – SEDURBS (2021).

Esta barragem efetua o barramento no rio Poxim, e seu principal uso é para abastecimento humano. Sendo sua área total equivalente a 118,99 km², e capacidade de armazenamento de volume de água igual a 32.730.000 m³, com cota mínima operacional de 20,80 m e máxima *maximorum* de 32,85 m. A largura, a cota da crista e altura máxima da barragem são equipolentes a 8,0 m, 34,0 m e 25,0 m, respectivamente.

A barragem do Poxim possui ainda um extravasor, também chamado de vertedouro, do tipo labirinto localizado perto do contato com a ombreira esquerda, de largura igual de 11,80 m, cota da soleira de 30,0 m e possui uma vazão de projeto para um período de retorno (PR) de 1000 anos igual a 212,80 m³/s.

A fundação onde se apoia o maciço principal da barragem do Poxim é constituída por solo residual e rocha calcária, sendo estes decorrentes de processos

de decomposição e alteração de maciços rochosos, sem haver o transporte do seu local de origem. Houve melhoramento da fundação com o emprego do *cut-off* e de injeções cimentícias com o intuito de reduzir o fluxo d'água pela fundação.

A barragem do Poxim possui um órgão empreendedor, que é o responsável pelo monitoramento e gerenciamento da barragem, e outro órgão fiscalizador, que faz cumprir todas as diretrizes e procedimentos corretos a serem observados junto ao órgão empreendedor.

Com relação a classificação final da barragem do Poxim no que diz respeito ao dano e risco que a mesma apresenta, pode-se afirmar que essa barragem possui categoria de risco baixa e dano potencial associado alto, o que permite classificá-la como categoria B, ou seja, as ações para manutenção da sua segurança devem ser realizadas ao longo do tempo de toda sua vida útil (ANEEL, 2020).

A Figura 10, a seguir, apresenta uma vista superior da barragem do rio Poxim, onde observa-se o seu eixo, bem como os taludes de montante e jusante. Destaca-se nessa figura as seções instrumentadas E40 e E50.

Figura 10 – Vista superior da barragem do rio Poxim.



Fonte: RMA 21 (2021).

A seção E40 possui quatro (4) piezômetros, enquanto que a seção instrumentada E50 possui três (3) piezômetros.

3.3 MODELAGENS NUMÉRICAS

Para a realização das modelagens numéricas foi adotada a seção instrumentada E50, e não a E40, por ser esta mais fácil de modelar nos programas utilizados nesse trabalho.

Os valores das coordenadas para a definição da geometria da seção instrumentada E50 foram obtidos tomando-se por base os dados presentes no RMA 21 (Relatório Mensal de Andamento), por meio de verificação visual da geometria desta seção da barragem, visto que não se teve acesso a dados mais precisos.

Na modelagem numérica do talude de jusante foi considerada a sua situação mais desfavorável, ou seja, durante o funcionamento normal da barragem.

Na modelagem do talude de montante foram consideradas as duas situações mais críticas, as quais são: final de construção e nível d'água do reservatório na sua cota normal de funcionamento de 27,7 metros. O nível máximo *maximorum* é de 32,85 metros.

Importante ressaltar que tanto o Geo5 quanto o Optum G2 analisam somente um talude por vez, ou montante ou jusante, isoladamente, diferentemente do software GeoStudio. O GeoStudio é o software utilizado para determinar o fator de segurança da barragem estudada, cujo valor consta nos RMA's emitidos pela empresa de consultoria contratada pelo órgão empreendedor para acompanhar a estabilidade e segurança da barragem, e trabalha com os taludes de montante e jusante simultaneamente.

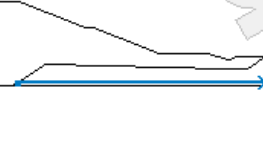
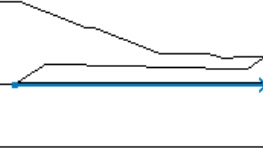
3.3.1 Considerações Geo5

Nesse software utilizou-se a versão demo, por ser gratuita. Essa versão apresenta algumas limitações como não permitir ao usuário salvar, copiar dados ou imprimir o projeto. No entanto, essa versão não possui nenhuma restrição de material, podendo ser empregados diferentes tipos de solo, ou serem realizadas diversas análises de estabilidade, sendo capaz de executar todos os cinco (5) métodos disponíveis no software.

A Figura 11 apresenta as coordenadas de cada ponto utilizado para definir as interfaces dos solos, bem como a sua respectiva localização na seção do talude de jusante.

Figura 11 – Coordenadas dos pontos e localização das interfaces no talude de Jusante.

Interface

No.	Localização da interface	Coordenadas dos pontos de interface [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		-4,00	34,00	4,00	34,00	29,00	24,00
		32,00	24,00	57,00	14,00	75,00	14,00
		82,00	12,00	84,00	12,00	86,00	13,00
		97,00	13,00				
2		-4,00	2,00	2,00	2,00	3,50	3,00
		14,00	10,00	90,00	8,00	97,00	13,00
3		3,50	3,00	97,00	3,00		
4		2,00	2,00	97,00	2,00		

Fonte: Autor (2021).

A Figura 12 apresenta as coordenadas de cada ponto utilizado para definir as interfaces dos solos, bem como a sua respectiva localização na seção do talude de montante na fase de final de construção.

Figura 12 – Coordenadas dos pontos e localização das interfaces no talude de montante (final de construção).

Interface		Coordenadas dos pontos de interface [m]					
No.	Localização da interface	x	z	x	z	x	z
1		-95,00	15,00	-55,00	15,00	-4,00	34,00
		4,00	34,00				
2		-95,00	15,00	-87,00	10,00	-14,00	10,00
		-2,00	2,00	4,00	2,00		
3		-95,00	3,00	-3,54	3,00		
4		-95,00	2,00	-2,00	2,00		

Fonte: Autor (2021).

A Figura 13 apresenta as coordenadas de cada ponto utilizado para definir o nível do lençol freático, bem como a sua respectiva localização na seção do talude de montante na fase de funcionamento da barragem, apresentando o nível d'água na cota de 27,7 metros.

Figura 13 – Coordenadas e localização do nível freático a 27,7 metros.

No.	Localização do nível freático	Coordenadas dos pontos de nível freático [m]					
		x	z	x	z	x	z
1		-95,00	27,70	-20,91	27,70	2,00	15,00
		4,00	15,00				

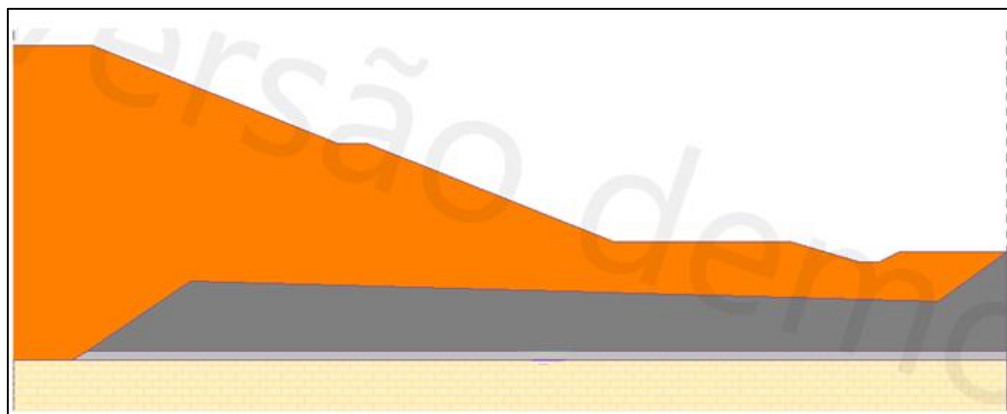
Fonte: Autor (2021).

Os parâmetros dos solos inseridos no software estão descritos na Figura 14. Os valores dos parâmetros apresentados nessa figura constam no relatório RMA 21,

exceto os valores do peso específico saturado (γ_{sat}) referentes a cada solo. Pelo desconhecimento do valor desse parâmetro e sendo este necessário para a realização das simulações no Geo5, foram adotados valores para o γ_{sat} tomando-se por base os valores dos seus respectivos pesos específicos natural. Assim, foi considerado que o γ_{sat} dos solos é igual ao γ_{nat} mais duas unidades.

Figura 14 – Parâmetros do solo e representação gráfica da geometria.

Parâmetros do solo	
Aterro Compactado	
Peso específico :	$\gamma = 18,00 \text{ kN/m}^3$
Estado de tensão :	efetivo
Ângulo de atrito interno :	$\phi_{\text{ef}} = 25,00^\circ$
Coesão do solo :	$c_{\text{ef}} = 20,00 \text{ kPa}$
Peso volúmico saturado :	$\gamma_{\text{sat}} = 20,00 \text{ kN/m}^3$
Areia/Pedregulhos Aluvionares	
Peso específico :	$\gamma = 16,00 \text{ kN/m}^3$
Estado de tensão :	efetivo
Ângulo de atrito interno :	$\phi_{\text{ef}} = 30,00^\circ$
Coesão do solo :	$c_{\text{ef}} = 0,00 \text{ kPa}$
Peso volúmico saturado :	$\gamma_{\text{sat}} = 18,00 \text{ kN/m}^3$
Solo Residual (fundação)	
Peso específico :	$\gamma = 18,00 \text{ kN/m}^3$
Estado de tensão :	efetivo
Ângulo de atrito interno :	$\phi_{\text{ef}} = 25,00^\circ$
Coesão do solo :	$c_{\text{ef}} = 25,00 \text{ kPa}$
Peso volúmico saturado :	$\gamma_{\text{sat}} = 20,00 \text{ kN/m}^3$



Fonte: Autor (2021).

É importante ressaltar também a presença da rocha calcária situada na base da barragem. Por se tratar de uma rocha impenetrável e por não dispor de parâmetros especificados no RMA 21, foi necessário adotar esta camada como corpo rígido na simulação pelo Geo5, o qual exige a inserção da informação referente ao seu peso específico natural. Sendo assim, pela falta dessa informação, foram arbitrados valores diferentes para este parâmetro (peso específico natural da rocha calcária) e realizadas

as análises de estabilidade. Constatou-se que, independente dos valores inseridos, o fator de segurança de todas as análises de estabilidade efetuadas permanecia inalterado, o que levou a conclusão da não influência desse parâmetro nas análises realizadas.

3.3.2 Considerações Optum G2

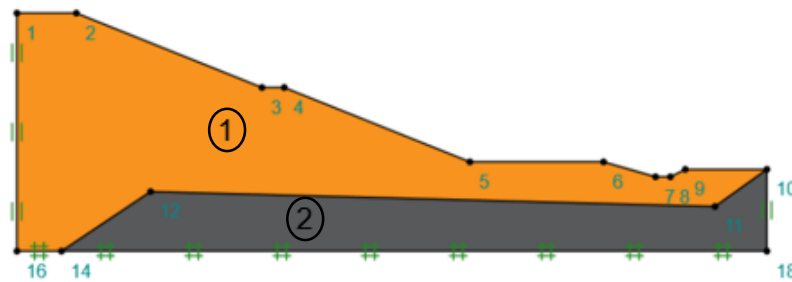
Nesse software foi usada a versão teste, válida por trinta (30) dias, por ser gratuita. Apesar de permitir salvar o projeto, copiar os dados e imprimir o relatório com todas as informações de entrada e os resultados obtidos das análises de estabilidade, só admite empregar na elaboração da modelagem da seção apenas dois tipos de materiais.

Devido a essa limitação, foi necessário admitir que a camada de solo da região 2 se estendesse até se encontrar no mesmo nível inferior da camada de solo da região 1 (conforme ilustram as Figuras 15,16 e 17), pois somente assim o software foi capaz de realizar as análises de forma satisfatória.

Para poder comparar os resultados das análises de estabilidade do OptumG2 com o software Geo5, foi de suma importância que, em ambos, fossem inseridas as mesmas coordenadas.

A Figura 15 apresenta as coordenadas de cada ponto utilizado para definir as regiões dos solos, bem como a sua respectiva localização na seção do talude de jusante.

Figura 15 – Coordenadas e localização dos pontos na seção do talude de jusante.

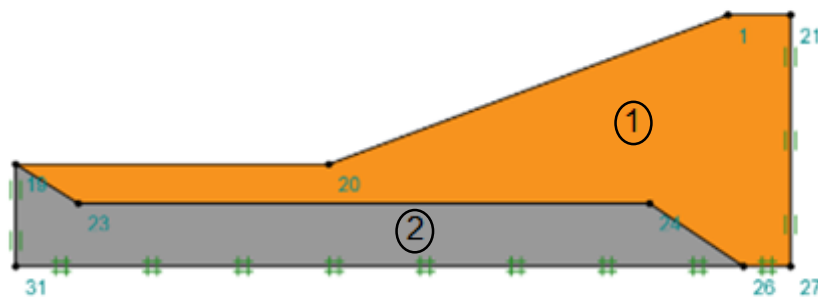


Nó	x (m)	y (m)
1	-4.00	34.00
2	4.00	34.00
3	29.00	24.00
4	32.00	24.00
5	57.00	14.00
6	75.00	14.00
7	82.00	12.00
8	84.00	12.00
9	86.00	13.00
10	97.00	13.00
11	90.00	8.00
12	14.00	10.00
14	-95.00	2.00
16	-20.91	2.00
18	4.00	2.00

Fonte: Autor (2021).

A Figura 16 apresenta as coordenadas dos pontos utilizados para definir as regiões dos solos, bem como a sua respectiva localização na seção do talude de montante na fase de final de construção.

Figura 16 – Coordenadas e localização dos pontos na seção do talude de montante (final de construção).



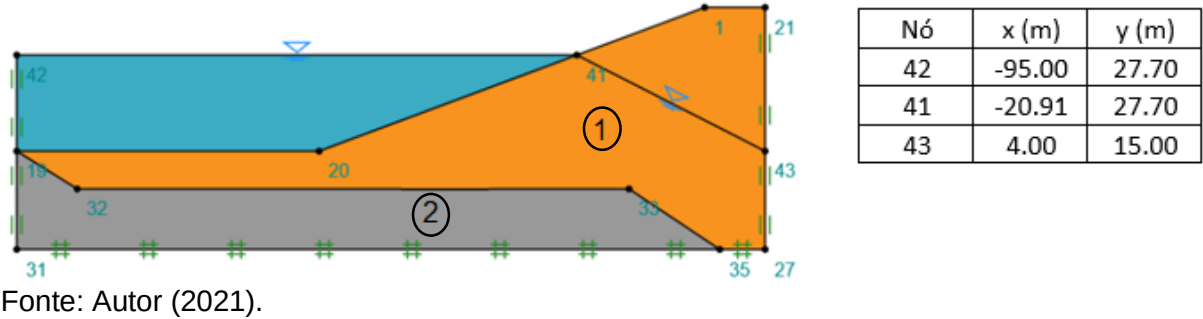
Nó	x (m)	y (m)
19	-95.00	15.00
20	-55.00	15.00
1	-4.00	34.00
21	4.00	34.00
27	4.00	2.00
26	-2.00	2.00
24	-14.00	10.00
23	-87.00	10.00
31	-95.00	2.00

Fonte: Autor (2021).

A Figura 17, por sua vez, apresenta a seção do talude de montante na fase de funcionamento da barragem, bem como as coordenadas de cada ponto utilizado para determinar o nível do lençol freático na cota de 27,7 metros. No entanto, esse software não realizou as análises de forma coerente ao se utilizar as mesmas coordenadas do

Geo5. Por essa razão, foi adotado a exclusão da coordenada (2.00;15.00), para poder se adequar ao software.

Figura 17 – Coordenadas e localização do nível freático a 27,7 metros.



A Figura 18 representa os parâmetros do solo contidos no RMA 21, o qual foi fornecido pelo órgão empreendedor da barragem. Para o material aterro compactado, por existirem dois dados para a coesão e o ângulo de atrito, foram adotados os valores de 20 kPa e 25°, respectivamente.

Figura 18 – Parâmetros do solo.

Material	γ (kN/m ³)	c'/Su (kPa)	ϕ (°)
Aterro compactado	18	20	25
		10	30
Areia média (filtro)	18	0	30
Argila siltosa aluvionar mole a média	16	20	-
Argila siltosa aluvionar média a rija	16	50	-
Areia/pedregulhos aluvionares	16	-	30
Solo residual (fundação)	18	25	25
Rocha calcária (fundação)	-	-	-

* Cruz (1996)

Fonte: Adaptado RMA 21 (2021).

O OptumG2 também necessita de outros parâmetros intrínsecos dos solos, tais como o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (η). Pela ausência dos valores desses parâmetros no RMA 21, os mesmos foram adotados utilizando as tabelas disponíveis na literatura. A Figura 19, proposta por Marangon (2018),

apresenta os parâmetros geotécnicos para as areias e solos arenosos. Assim, foram adotados para os materiais das regiões 1 e 2, respectivamente, os maiores valores de E e η apresentados nesta tabela, os quais foram: para o material da região 1 (aterro compactado), o valor de $E = 1400 \text{ t/m}^2 = 14 \text{ MPa}$ e para o material da região 2 (areia/pedregulhos aluvionares), o valor de $E = 500 \text{ t/m}^2 = 5 \text{ MPa}$. Para os solos das duas regiões foi adotado o valor de $\eta = 0,4$.

Figura 19 – Parâmetros geotécnicos para areias e solos arenosos.

Areias e Solos Arenosos					
Compacidade	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ	E (t/m ²)	ν
Fofa	1,6	0	25 - 30	100 - 500	0,3 a 0,4
Pouco Compacta	1,8	0	30 - 35	500 - 1400	
Medianamente Compacta	1,9	0	35 - 40	1400 - 4000	
Compacta	2,0	0	40 - 45	4000 - 7000	
Muito Compacta	> 2,0	0	> 45	> 7000	

Fonte: Adaptado Marangon (2018).

Dessa forma, a Figura 20 apresenta os parâmetros dos solos exibidos pelo OptumG2, que além dos mencionados, apresenta outros, sendo que estes são os parâmetros da configuração padrão do software, os quais não houve a necessidade de alteração.

Figura 20 – Parâmetros do solo exibidos pelo OptumG2.

Areia/Pedregulho aluvionares

Cor	
Tipo de Material	Mohr-Coulomb
E (MPa)	5
ν (-)	0.4
c (kPa)	0
ϕ (°)	30
γ_{dry} (kN/m ³)	16
γ_{sat} (kN/m ³)	18
K_x (m/day)	1E-05
K_y (m/day)	1E-05
h^* (m)	1

Aterro Compactado

Cor	
Tipo de Material	Mohr-Coulomb
E (MPa)	14
ν (-)	0.4
c (kPa)	20
ϕ (°)	25
γ_{dry} (kN/m ³)	18
γ_{sat} (kN/m ³)	20
K_0 (-)	0.5
σ_0 (kPa)	0
K_x (m/day)	1E-05

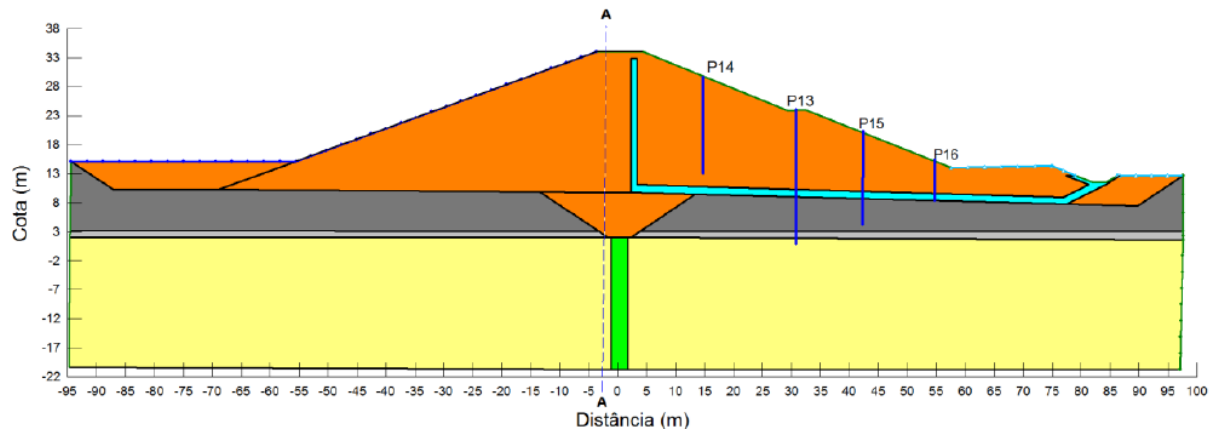
Fonte: Autor (2021).

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 SEÇÃO INSTRUMENTADA E50

A Figura 21 abaixo ilustra a seção instrumentada E50, a qual foi utilizada na modelagem empregando os softwares Geo5 e OptumG2 para a verificação da estabilidade de seus taludes de montante e jusante.

Figura 21 – Corte transversal da seção instrumentada E50.



Fonte: RMA 21.

A Figura 22 diferencia os materiais que constituem a seção transversal do corpo da barragem, bem como informa os coeficientes de permeabilidade desses materiais na direção x (sentido montante-jusante).

Figura 22 – Coeficientes de permeabilidade adotados na seção instrumentada E50.

Material	Legenda	k_x (m/s)	k_y/k_x
Aterro compactado		10^{-9}	0,5
Filtro		10^{-3}	1,0
Solo Residual (Fundação)		10^{-6}	1,0
Rocha Calcária (Fundação)		2×10^{-6}	1,0
Cortina de Impermeabilização		10^{-7}	1,0
Areia/Pedregulhos Aluvionares		10^{-4}	1,0

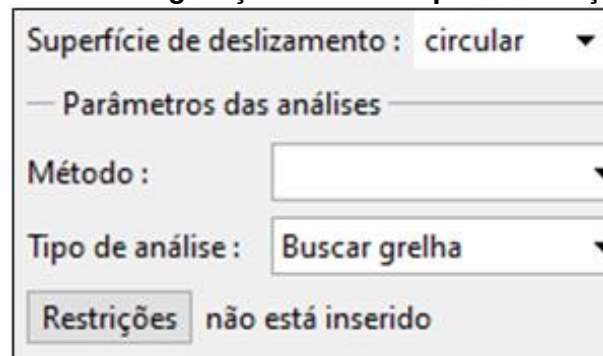
Fonte: RMA 21 (2021).

4.2 CONFIGURAÇÕES DOS SOFTWARES ANTES DAS ANÁLISES

4.2.1 Geo5

No software Geo5 foi utilizado a superfície de deslizamento circular e o tipo de análise empregada foi a 'buscar grelha', na qual o aplicativo fornece todas as superfícies prováveis de ruptura e suas respectivas representações gráficas na seção de barragem, conforme demonstra Figura 23. Posteriormente deve-se definir qual método será empregado (Bishop, Fellenius ou Morgenstern-Price) e, em seguida, realizar as análises.

Figura 23 – Configurações do Geo5 para execução das análises.



A imagem mostra uma interface de configuração do software Geo5. No topo, há um campo rotulado 'Superfície de deslizamento:' com o valor 'circular' selecionado em um menu suspenso. Abaixo, uma seção intitulada 'Parâmetros das análises' contém dois campos: 'Método:' e 'Tipo de análise:'. O campo 'Tipo de análise:' tem 'Buscar grelha' selecionado. Na base da interface, há uma caixa de texto que diz 'Restrições não está inserido'.

Fonte: Autor (2021).

4.2.2 OptumG2

No software OptumG2 foram definidas algumas configurações antes da realização das análises. Primeiramente, a análise escolhida foi a de redução de resistência por ser a mais indicada para estabilidade de taludes. A Figura 24 apresenta os detalhes dessas configurações, como o modelo escolhido com adaptação da malha, pois exibe uma superfície de ruptura mais contínua e definida e o número de elementos adotado foi igual a dez mil (10000), pelo fato de quanto maior o número de elementos menor será o intervalo entre os fatores de segurança limite, inferior e superior, e os resultados serem mais precisos. Além disso, a Figura 24 também traz alguns elementos que fazem parte da configuração padrão do software.

Figura 24 – Configurações do OptumG2 para execução das análises.

Configurações

Reduzir Resistência emSólidos

Escopo com Relação aProlongado

Tipo de ElementoSuperior

Número de Elementos10000

Malha

Adaptação da MalhaSim

Número de Iterações n3

Número de Elementos10000

Controle de AdaptaçãDissipação de Cisa

Segurança

Abordagem de ProjetoUnity

Configurações

Reduzir Resistência emSólidos

Escopo com Relação aProlongado

Tipo de ElementoInferior

Número de Elementos10000

Malha

Adaptação da MalhaSim

Número de Iterações n3

Número de Elementos10000

Controle de AdaptaçãDissipação de Cisa

Segurança

Abordagem de ProjetoUnity

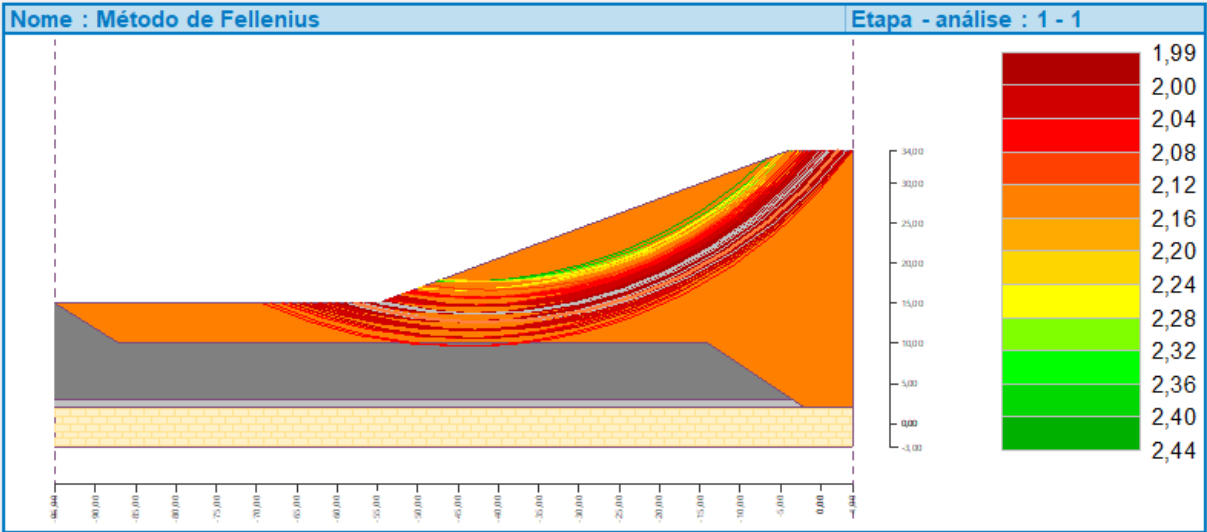
Fonte: Autor (2021).

4.3 TALUDE DE MONTANTE (FINAL DE CONSTRUÇÃO)

4.3.1 Resultados apresentados pelo Geo5

Utilizando o método de Fellenius, obtem-se as prováveis superfícies de ruptura e o fator de segurança de 1,99 apresentados pela Figura 25. Também foram encontrados: o somatório de forças ativas de 2395,33 kN/m e de forças passivas de 4759,74 kN/m; os momentos de deslizamento e resistente, 133707,53 kNm/m e 265688,47 kNm/m, respectivamente.

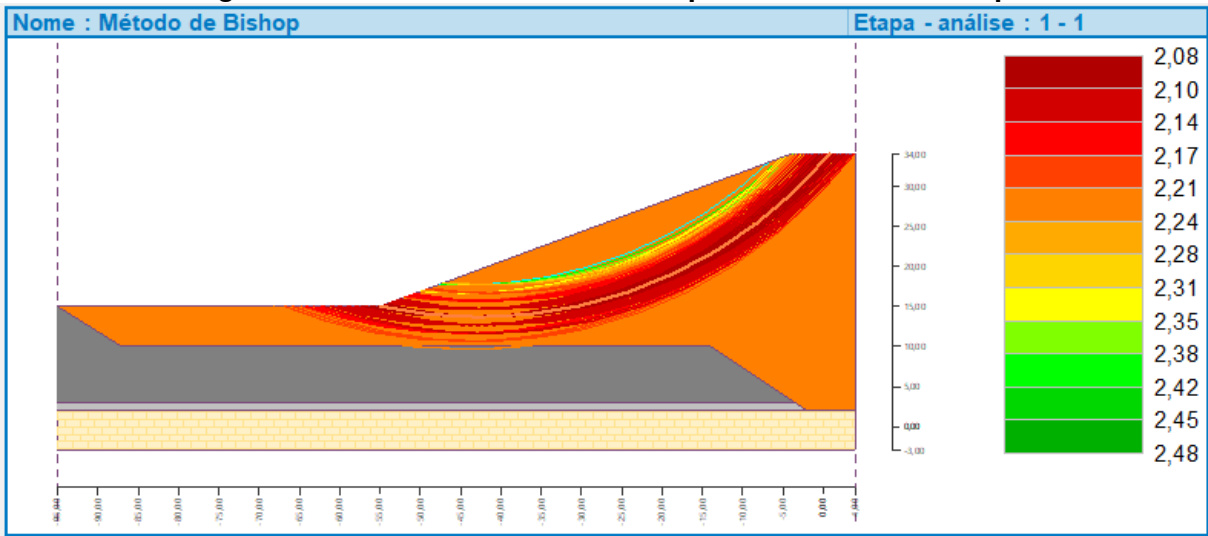
Figura 25 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 26 apresenta os dados obtidos utilizando o método de Bishop, bem como as prováveis superfícies de ruptura e seus respectivos fatores de segurança, sendo 2,08 o mais desfavorável. O método também exibiu o somatório das forças ativas igual a 2075,22 kN/m, o somatório de forças passivas de 4325,77 kN/m, o momento de deslizamento de 117914,03 kNm/m e o momento resistente de 245790,50 kNm/m.

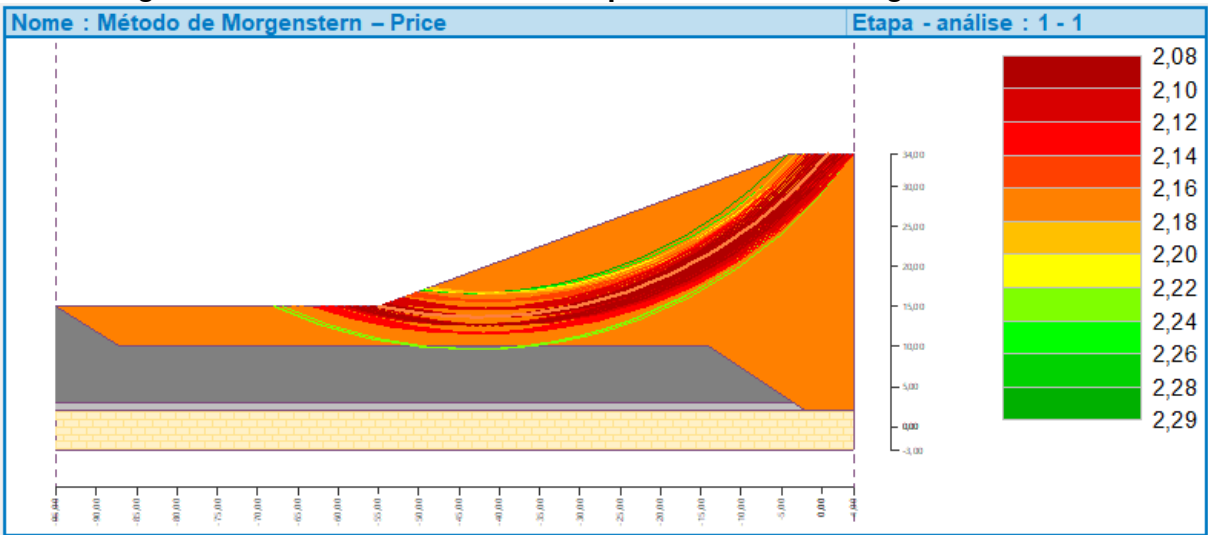
Figura 26 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 27, por sua vez, apresenta as prováveis superfícies de ruptura obtidas através da aplicação do método de Morgenstern-Price, sendo o fator de segurança mínimo equipolente ao de Bishop, ou seja, a 2,08.

Figura 27 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autor (2021).

4.3.2 Resultados apresentados pelo OptumG2

O OptumG2 apresenta dois fatores de segurança limite, um superior e outro inferior. Dessa forma, a fim de ter um único valor para comparar com os fatores de segurança do software Geo5, fez-se uma média aritmética desses limites. Assim, sendo o limite superior do fator de segurança igual a 2,074 e o limite inferior igual a 2,054, o valor médio será igual a 2,064. A Figura 28 apresenta esses resultados.

Figura 28 – Fatores de segurança limite do talude de montante (final de construção).

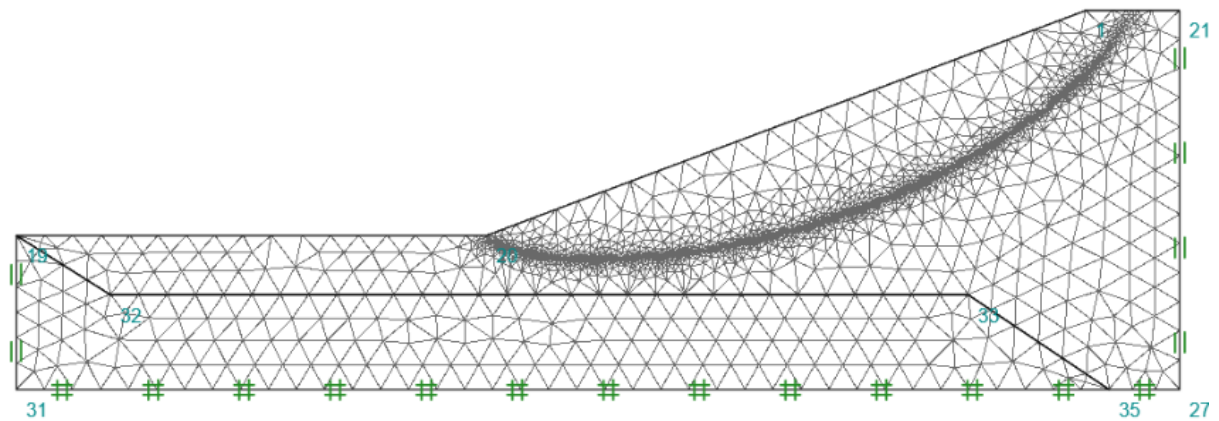
ESTÁGIO:		Limite Superior	
TIPO DE ANÁLISE:		Redução de Resistência	
TIPO DE ELEMENTO:		Superior	
ESCOPO DE TEMPO:		Prolongado	
ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE
1	1	1,000E+00	Estável
1	2	2,000E+00	Estável
1	3	4,000E+00	Instável
1	4	3,000E+00	Instável
1	5	2,500E+00	Instável
1	6	2,250E+00	Instável
1	7	2,125E+00	Instável
1	8	2,063E+00	Estável
1	9	2,094E+00	Instável
1	10	2,078E+00	Estável
2	1	2,078E+00	Instável
2	2	1,906E+00	Estável
2	3	1,992E+00	Estável
2	4	2,035E+00	Estável
2	5	2,057E+00	Estável
2	6	2,067E+00	Estável
3	1	2,067E+00	Estável
3	2	2,121E+00	Instável
3	3	2,094E+00	Instável
3	4	2,081E+00	Instável
3	5	2,074E+00	Instável
3	6	2,071E+00	Estável
NUM DE TRIÂNGULOS = 10868			
NUM DE ARESTAS = 16471			
NUM DE NÓS = 5510			
MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.074			

ESTÁGIO:		Limite Inferior	
TIPO DE ANÁLISE:		Redução de Resistência	
TIPO DE ELEMENTO:		Inferior	
ESCOPO DE TEMPO:		Prolongado	
ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE
1	1	1,000E+00	Estável
1	2	2,000E+00	Estável
1	3	4,000E+00	Instável
1	4	3,000E+00	Instável
1	5	2,500E+00	Instável
1	6	2,250E+00	Instável
1	7	2,125E+00	Instável
1	8	2,063E+00	Estável
1	9	2,094E+00	Instável
1	10	2,078E+00	Instável
1	11	2,070E+00	Instável
1	12	2,066E+00	Instável
1	13	2,064E+00	Instável
2	1	2,064E+00	Estável
2	2	2,251E+00	Instável
2	3	2,158E+00	Instável
2	4	2,111E+00	Instável
2	5	2,088E+00	Instável
2	6	2,076E+00	Instável
2	7	2,070E+00	Instável
2	8	2,067E+00	Estável
3	1	2,067E+00	Instável
3	2	2,015E+00	Estável
3	3	2,041E+00	Estável
3	4	2,054E+00	Estável
NUM DE TRIÂNGULOS = 5540			
NUM DE ARESTAS = 8366			
NUM DE NÓS = 2827			
MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.054			

Fonte: Autor (2021).

A Figura 29 apresenta a mais provável superfície de ruptura para o talude de montante sem a presença da lâmina d'água do reservatório.

Figura 29 – Provável superfície de ruptura no talude de montante (final de construção)



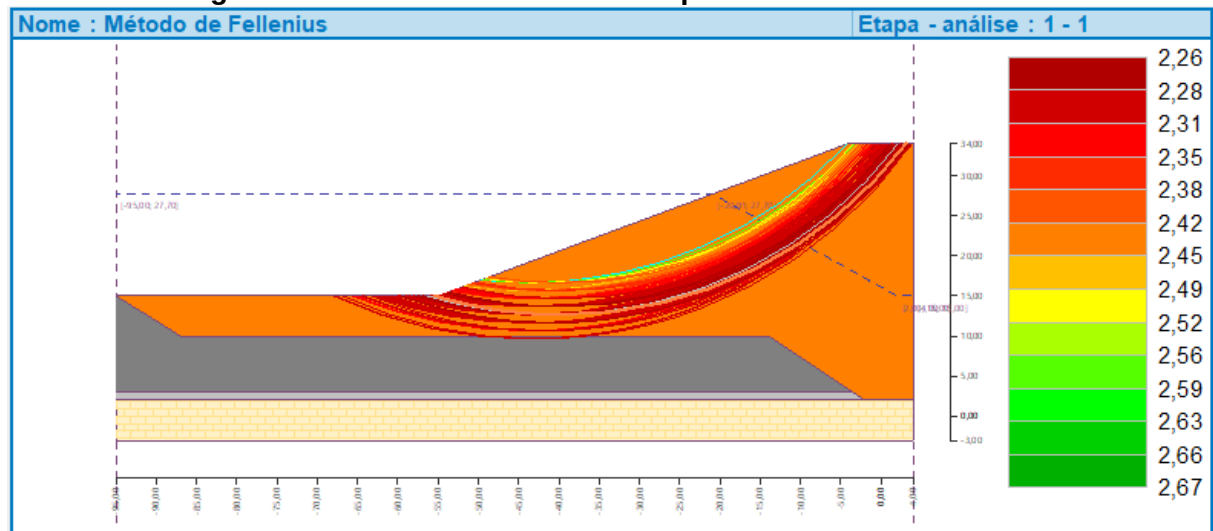
Fonte: Autor (2021).

4.4 TALUDE DE MONTANTE (FASE DE OPERAÇÃO)

4.4.1 Resultados apresentados pelo Geo5

Utilizando o método de Fellenius, obtém-se as prováveis superfícies de ruptura e o menor fator de segurança igual a 2,26, conforme ilustra a Figura 30. Também foram encontrados: o somatório de forças ativas de 1717,77 kN/m e de forças passivas de 3878,15 kN/m; os momentos de deslizamento e resistente, 92450,21 kNm/m e 208722,04 kNm/m, respectivamente.

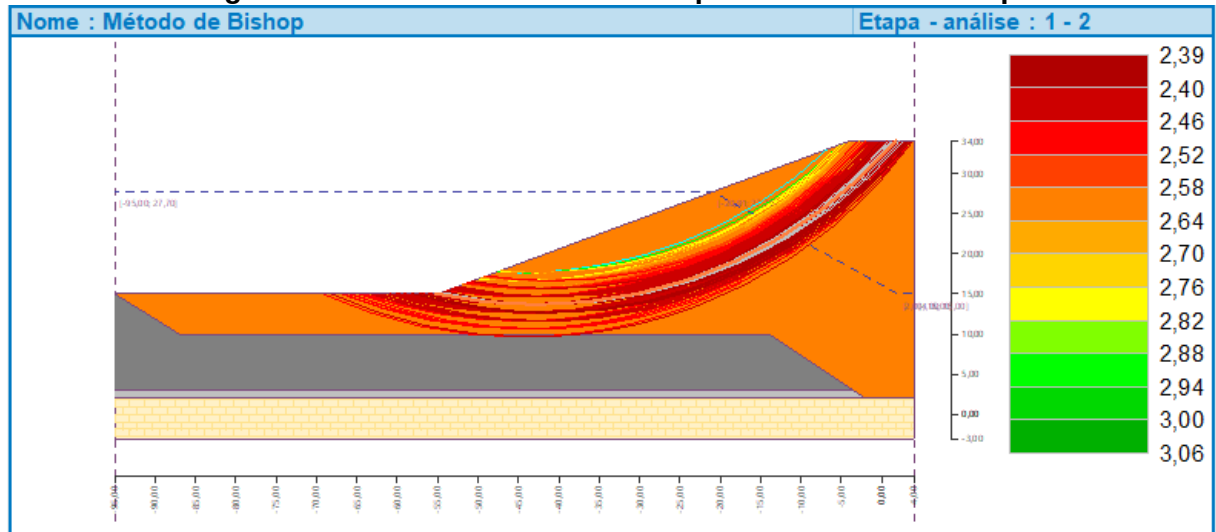
Figura 30 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 31 apresenta os dados obtidos utilizando o método de Bishop, bem como as prováveis superfícies de ruptura e seus respectivos fatores de segurança, sendo 2,39 o mais desfavorável. O método também exibiu o somatório das forças ativas igual a 1475,63 kN/m, o somatório de forças passivas de 3521,38 kN/m, o momento de deslizamento de 86796,63 kNm/m e o momento resistente de 207127,28 kNm/m.

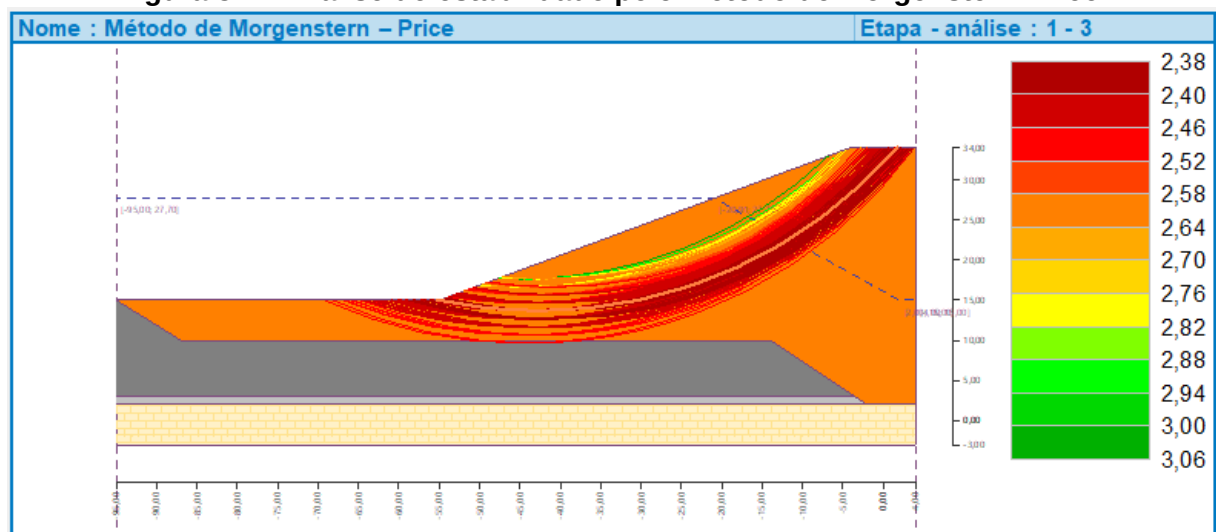
Figura 31 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 32, por sua vez, apresenta as prováveis superfícies de ruptura obtidas através da aplicação do método de Morgenstern-Price, sendo o menor fator de segurança igual a 2,38, similar ao obtido pelo método de Bishop.

Figura 32 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autor (2021).

4.4.2 Resultados apresentados pelo OptumG2

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para o limite superior do fator de segurança igual a 2,444 e o limite inferior igual a 2,420, o valor médio será igual a 2,432 para o talude de montante em fase de operação.

Figura 33 – Fatores de segurança limite do talude de montante (fase de operação).

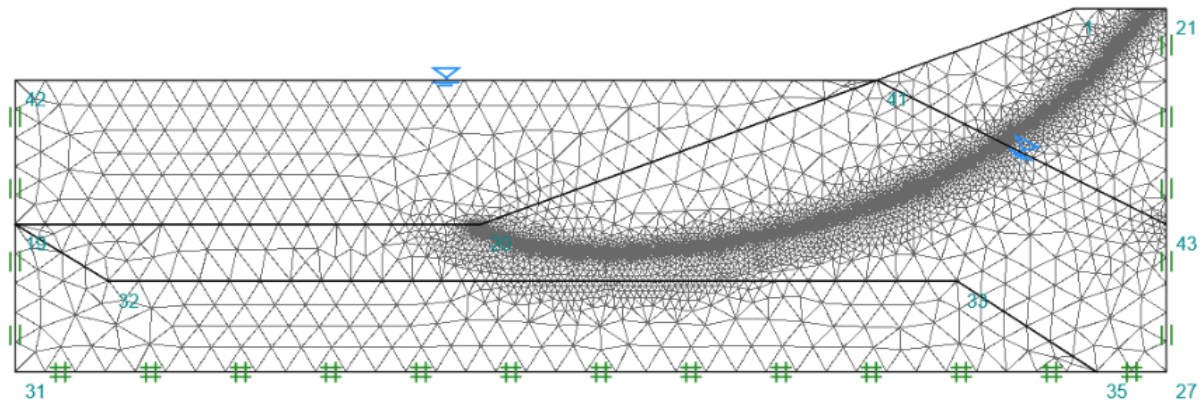
ESTÁGIO: Limite Superior			
TIPO DE ANÁLISE: Redução de Resistência			
TIPO DE ELEMENTO: Superior			
ESCOPO DE TEMPO: Prolongado			
Running Infiltração analysis			
ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE
1	1	1,000E+00	Estável
1	2	2,000E+00	Estável
1	3	4,000E+00	Instável
1	4	3,000E+00	Instável
1	5	2,500E+00	Instável
1	6	2,250E+00	Estável
1	7	2,375E+00	Estável
1	8	2,438E+00	Estável
1	9	2,469E+00	Instável
1	10	2,453E+00	Estável
Running Infiltração analysis			
2	1	2,453E+00	Instável
2	2	2,250E+00	Estável
2	3	2,351E+00	Estável
2	4	2,402E+00	Estável
2	5	2,428E+00	Estável
2	6	2,440E+00	Estável
Running Infiltração analysis			
3	1	2,440E+00	Estável
3	2	2,504E+00	Instável
3	3	2,472E+00	Instável
3	4	2,456E+00	Instável
3	5	2,448E+00	Instável
3	6	2,444E+00	Instável
3	7	2,442E+00	Estável
NUM DE TRIÂNGULOS = 9969 NUM DE ARESTAS = 15327 NUM DE NÓS = 5047			
MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.444			

ESTÁGIO: Limite Inferior			
TIPO DE ANÁLISE: Redução de Resistência			
TIPO DE ELEMENTO: Inferior			
ESCOPO DE TEMPO: Prolongado			
Running Infiltração analysis			
ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE
1	1	1,000E+00	Estável
1	2	2,000E+00	Estável
1	3	4,000E+00	Instável
1	4	3,000E+00	Instável
1	5	2,500E+00	Instável
1	6	2,250E+00	Estável
1	7	2,375E+00	Estável
1	8	2,438E+00	Instável
1	9	2,406E+00	Estável
1	10	2,422E+00	Estável
Running Infiltração analysis			
2	1	2,422E+00	Estável
2	2	2,641E+00	Instável
2	3	2,531E+00	Instável
2	4	2,477E+00	Instável
2	5	2,449E+00	Instável
2	6	2,436E+00	Estável
Running Infiltração analysis			
3	1	2,436E+00	Instável
3	2	2,374E+00	Estável
3	3	2,405E+00	Estável
3	4	2,420E+00	Estável
NUM DE TRIÂNGULOS = 9535 NUM DE ARESTAS = 14358 NUM DE NÓS = 4824			
MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.420			

Fonte: Autor (2021).

A Figura 34, por sua vez, apresenta a mais provável superfície de ruptura para o talude de montante em fase de operação, ou seja, com a presença da lâmina d'água do reservatório.

Figura 34 – Provável superfície de ruptura no talude de montante (fase de operação).



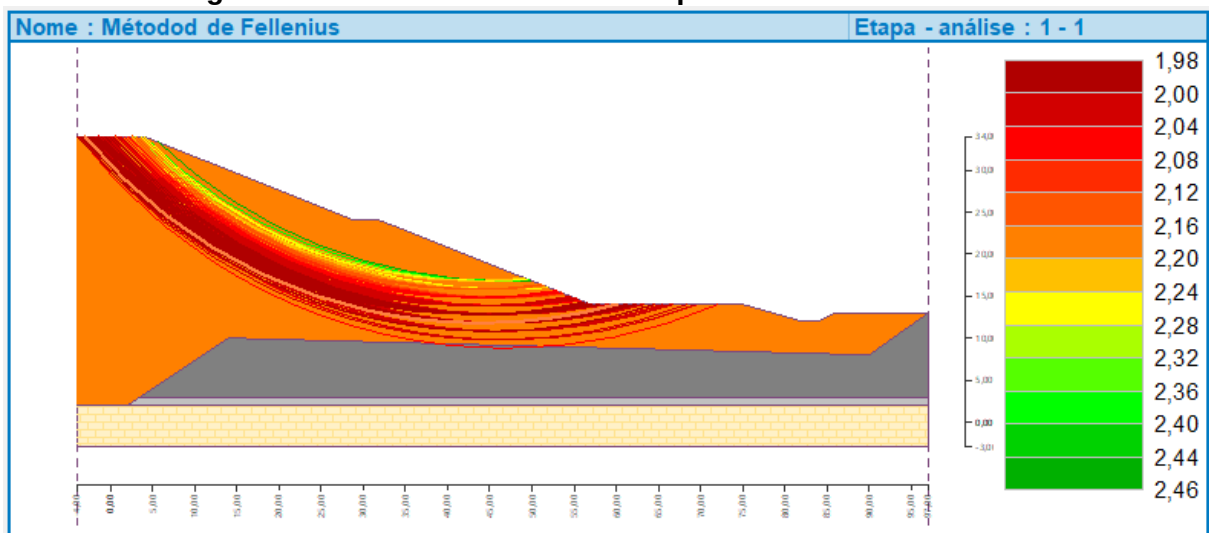
Fonte: Autor (2021).

4.5 TALUDE DE JUSANTE

4.5.1 Resultados apresentados pelo Geo5

Aplicando o método de Fellenius, obtém-se as prováveis superfícies de ruptura e o menor fator de segurança igual a 1,98, conforme ilustra a Figura 35. Também foram encontrados: o somatório de forças ativas de 2577,24 kN/m e de forças passivas de 5110,73 kN/m; os momentos de deslizamento e resistente, 156464,27 kNm/m e 310272,18 kNm/m, respectivamente.

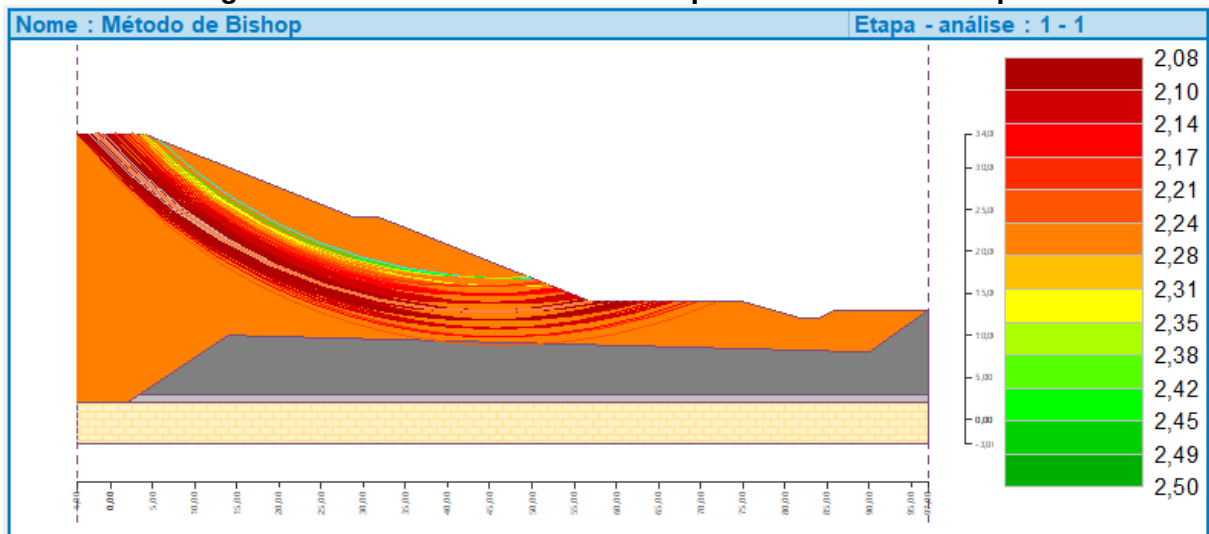
Figura 35 – Análise de estabilidade pelo método de Fellenius.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 36 apresenta os dados obtidos aplicando o método de Bishop, bem como as prováveis superfícies de ruptura e seus respectivos fatores de segurança, sendo 2,08 o mais desfavorável. O método também exibiu o somatório das forças ativas igual a 2235,43 kN/m, o somatório de forças passivas de 4642,08 kN/m, o momento de deslizamento de 137948,11 kNm/m e o momento resistente de 286462,70 kNm/m.

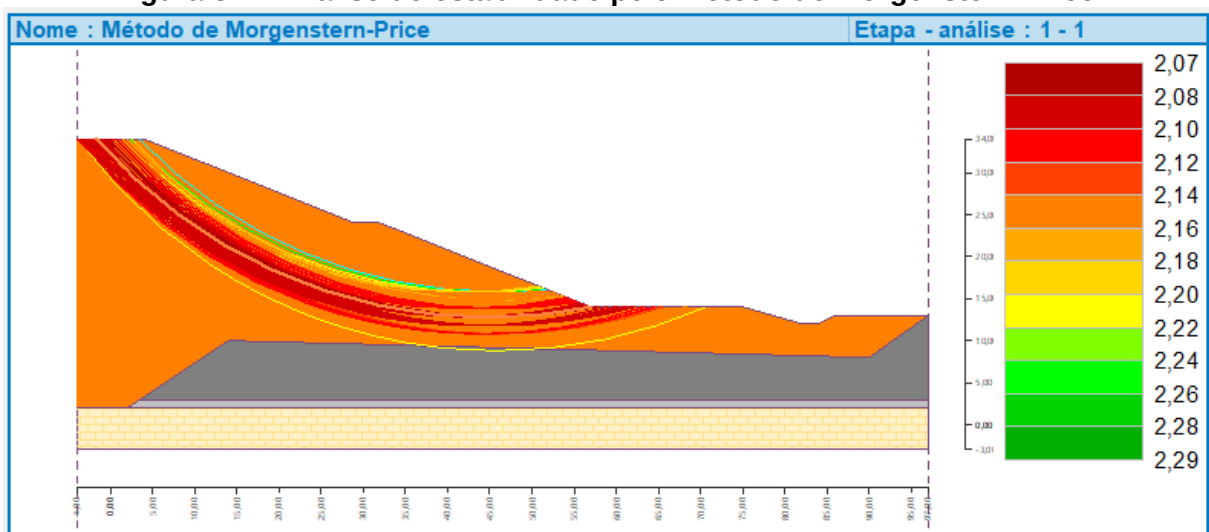
Figura 36 – Análise de estabilidade pelo método de Bishop.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 37, por sua vez, apresenta as prováveis superfícies de ruptura obtidas através do emprego do método de Morgenstern-Price, sendo o menor fator de segurança igual a 2,07, similar ao obtido pelo método de Bishop.

Figura 37 – Análise de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autor (2021).

4.5.2 Resultados apresentados pelo OptumG2

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos para o limite superior do fator de segurança igual a 2,061 e o limite inferior igual a 2,051, o valor médio será igual a 2,056 para o talude de jusante.

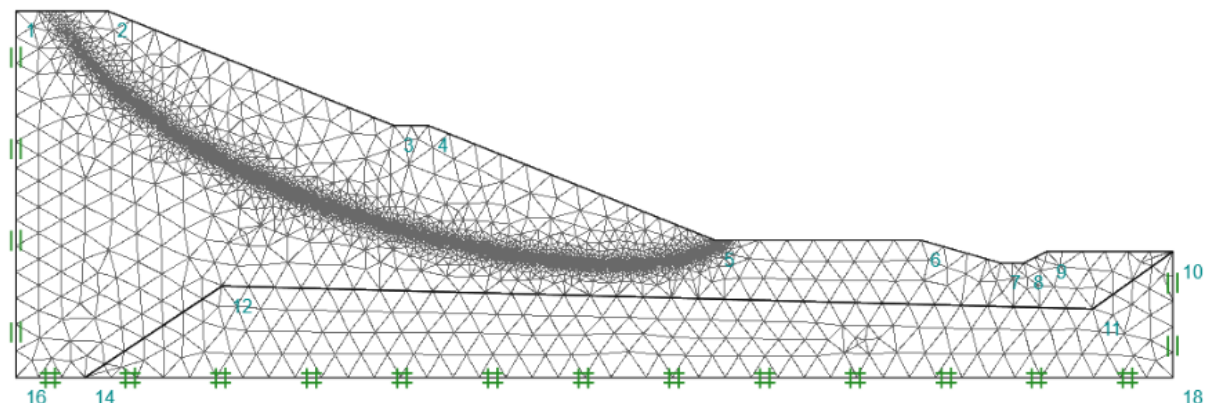
Figura 38 – Fatores de segurança limite para o talude de jusante.

ESTÁGIO: Limite Superior TIPO DE ANÁLISE: Redução de Resistência TIPO DE ELEMENTO: Superior ESCOPO DE TEMPO: Prolongado				ESTÁGIO: Limite Inferior TIPO DE ANÁLISE: Redução de Resistência TIPO DE ELEMENTO: Inferior ESCOPO DE TEMPO: Prolongado			
ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE	ADAPT STEP	ITERAÇÃO	REDUÇÃO FATOR	ESTABILIDADE
1	1	1,000E+00	Estável	1	1	1,000E+00	Estável
1	2	2,000E+00	Estável	1	2	2,000E+00	Estável
1	3	4,000E+00	Instável	1	3	4,000E+00	Instável
1	4	3,000E+00	Instável	1	4	3,000E+00	Instável
1	5	2,500E+00	Instável	1	5	2,500E+00	Instável
1	6	2,250E+00	Instável	1	6	2,250E+00	Instável
1	7	2,125E+00	Instável	1	7	2,125E+00	Instável
1	8	2,063E+00	Estável	1	8	2,063E+00	Instável
1	9	2,094E+00	Instável	1	9	2,031E+00	Estável
1	10	2,078E+00	Instável	1	10	2,047E+00	Estável
1	11	2,070E+00	Estável				
2	1	2,070E+00	Instável	2	1	2,047E+00	Estável
2	2	1,898E+00	Estável	2	2	2,232E+00	Instável
2	3	1,984E+00	Estável	2	3	2,140E+00	Instável
2	4	2,027E+00	Estável	2	4	2,093E+00	Instável
2	5	2,049E+00	Estável	2	5	2,070E+00	Instável
2	6	2,060E+00	Instável	2	6	2,058E+00	Instável
2	7	2,054E+00	Estável	2	7	2,053E+00	Instável
				2	8	2,050E+00	Estável
3	1	2,054E+00	Estável	3	1	2,050E+00	Estável
3	2	2,108E+00	Instável	3	2	2,103E+00	Instável
3	3	2,081E+00	Instável	3	3	2,076E+00	Instável
3	4	2,068E+00	Instável	3	4	2,063E+00	Instável
3	5	2,061E+00	Instável	3	5	2,056E+00	Instável
3	6	2,058E+00	Estável	3	6	2,053E+00	Instável
				3	7	2,051E+00	Estável
NUM DE TRIÂNGULOS = 10513 NUM DE ARESTAS = 15936 NUM DE NÓS = 5336 MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.061				NUM DE TRIÂNGULOS = 8746 NUM DE ARESTAS = 13183 NUM DE NÓS = 4438 MELHOR FATOR DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA = 2.051			

Fonte: Autor (2021).

A Figura 39 ilustra a mais provável superfície de ruptura para o talude de jusante da barragem.

Figura 39 – Provável superfície de ruptura no talude de jusante.



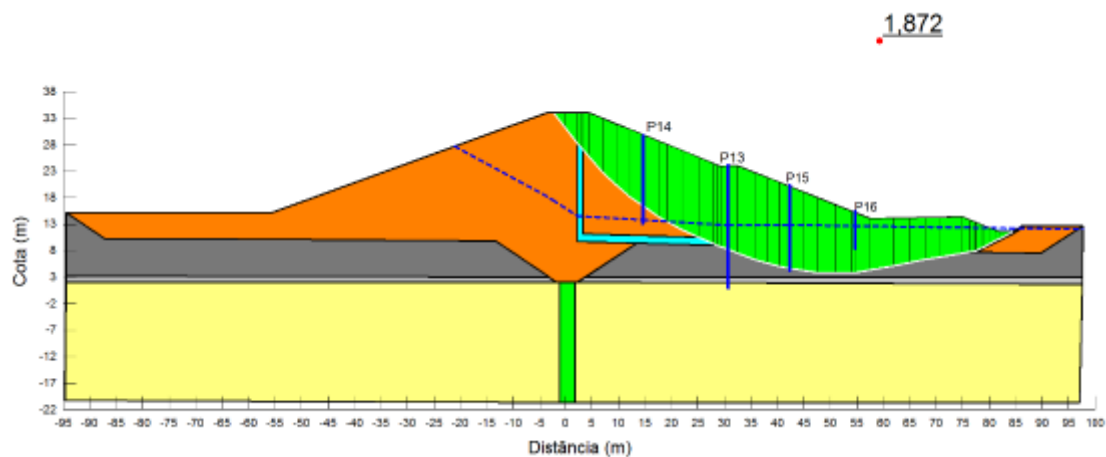
Fonte: Autor (2021).

4.5.3 Resultados apresentados pelo RMA 21

Nos relatórios mensais de andamento emitidos pela empresa contratada pelo órgão fiscalizador é apresentado apenas a análise da estabilidade do talude de jusante da barragem para as seções instrumentadas E40 e E50.

Para a seção E50, o valor do fator de segurança (F.S.) para o talude de jusante obtido através do software GeoStudio, empregando o método de Morgenstern-Price, foi igual a 1,872 (RMA 21, 2021). A Figura 40 apresenta o resultado dessa análise.

Figura 40 – Análise da estabilidade pelo método de Morgenstern-Price (GeoStudio).



Fonte: RMA 21 (2021).

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA

O Quadro 1 abaixo apresenta o resumo dos fatores de segurança obtidos através das análises realizadas nesse estudo.

Quadro 1 – Síntese das análises realizadas nesse estudo.

		Valores do Fator de Segurança (F.S.)		
		Talude de Montante		Talude de Jusante
		Fase final de construção	Fase de Operação	
Geo5	Fellenius	1,99	2,26	1,98
	Bishop	2,08	2,39	2,08
	Morgenstern-Price	2,08	2,38	2,07
OptumG2	MEF	2,064	2,432	2,056
GeoStudio*	Morgenstern-Price	-	-	1,872

* Informação disponível em RMA 21 (2021).

Fonte: Autor (2021).

Com base nas análises realizadas pelo software Geo5, verificou-se que os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Bishop e Morgenstern-Price estão muito próximos ou são iguais. Quanto aos fatores de segurança obtidos pelo método de Fellenius, constatou-se que eles são menores do que os outros dois métodos devido ao fato desse método ser mais conservador. Logo, eram esperados valores menores.

Excluindo os valores apresentados pelo método de Fellenius dados pelo software Geo5, pode-se constatar que os valores do fator de segurança obtidos pelo software OptumG2 estão próximos dos valores apresentados pelo software Geo5 para os métodos de Bishop e Morgenstern-Price. A diferença percentual entre o menor valor dado pelo software Geo5 e o valor apresentado pelo software OptumG2 é de 0,77%, 2,14% e 0,68% para os taludes de montante final de construção, montante fase de operação e de jusante, respectivamente.

O valor do fator de segurança do talude de jusante calculado pelo software GeoStudio leva em consideração o fluxo d'água existente entre os taludes de montante e jusante (percolação pelo corpo da barragem). Por este motivo, conforme consta no RMA 21, o valor do F.S. para este talude é inferior àqueles obtidos pelos softwares utilizados nesse estudo, o Geo5 e o OptumG2.

Em virtude do que foi dito no parágrafo acima e analisando o resultado das análises efetuadas neste estudo para o talude de jusante, comparando com o valor do fator de segurança apresentado no relatório RMA 21 da barragem, verificou-se que a diferença percentual é de 10,58% entre o F.S. obtido pelo software Geo5, aplicando o método de Morgenstern-Price, e o valor do F.S. apresentado nesse relatório. Já a diferença percentual entre o valor do F.S. obtido pelo software OptumG2 e o valor do F.S. do relatório é de 9,83%.

Assis (2003) apud Kalume (2017) apresenta os valores dos fatores de segurança mínimos em todas as etapas de funcionamento de uma barragem, os quais devem ser levados em consideração em projetos de barragens (Figura 41).

Figura 41 – Fatores de segurança mínimos.

Fases de Projeto	Talude	Fator de Segurança
Final de Construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Primeiro Enchimento	Montante	1,25 a 1,3
	Jusante	---
Regime de Operação	Montante	---
	Jusante	1,5
Rebaixamento Rápido	Montante	1,1 a 1,3
	Jusante	---

Fonte: Kalume (2017).

Os valores obtidos no Quadro 1 estão todos acima do mínimo estabelecidos na Figura 41 para o talude de jusante e de montante, nesta última apenas para a fase final de final de construção.

5. CONCLUSÕES

Com o presente estudo verificou-se a importância de acompanhar o comportamento de barragens de terra, através do monitoramento por meio de diversos instrumentos, por se tratarem de obras que podem vir a gerar, caso sejam abandonadas, danos materiais, humanos e ao meio ambiente. Além da verificação da estabilidade de seus taludes por meio de simulações numéricas.

Para corroborar com a fundamentação teórica, foi escolhida a barragem do rio Poxim para realizar uma inspeção visual e obter informações sobre os tipos de parâmetros que são monitorados durante a sua vida útil. Verificou-se *in loco* que a referida barragem possui monitoramento periódico realizado por uma empresa de consultoria, que realiza as leituras dos instrumentos nela instalados, bem como analisa a sua estabilidade utilizando o software GeoStudio.

Neste estudo foi realizada análises de estabilidade dos taludes de montante, considerando duas situações (final de construção e fase de operação), e de jusante empregando dois softwares muito conhecidos na área geotécnica: Geo5 e OptumG2.

Como resultado das análises efetuadas pelo Geo5, verificou-se que o fator de segurança pelo método de Fellenius apresenta sempre o menor valor, independente do talude e da situação analisada, por ser este método mais conservativo. Ainda como resultado das análises realizadas com este software, aplicando os métodos de Bishop e Morgenstern-Price, verificou-se que os valores de seus fatores de segurança são iguais ou muito próximos, o que confirma a precisão de seus resultados.

Como resultado das análises realizadas pelo OptumG2, constatou-se que os fatores de segurança apresentados por este software foram diferentes daqueles obtidos pelo software Geo5, tendo como maior desvio (2,14%) o fator de segurança para o talude de montante na fase de operação.

Por fim, comparando o resultado do fator de segurança obtido para a análise de estabilidade do talude de jusante pelo método de Morgenstern-Price (software Geo5) e pelo MEF (software OptmG2) com o fator de segurança disponível nos relatórios mensais, em específico no RMA 21, evidenciou-se que todos os valores estão acima do valor apresentado nesse relatório por terem sido feitas as análises sem considerar a percolação de água pelo corpo da barragem, ao contrário do que é possível realizar no software GeoStudio.

Todos os fatores de segurança, tanto os obtidos nessa pesquisa quanto àquele apresentado no RMA 21 para a barragem do rio Poxim, estão acima dos valores mínimos para os taludes de barragens (montante e jusante) disponíveis na literatura.

Comparando-se o emprego dos softwares neste estudo, pode-se afirmar que o Geo5 tem uma melhor facilidade de uso em função do seu menu principal e ferramentas serem autoexplicativos. Este software admite o emprego de várias camadas de materiais distintos, possibilitando a modelagem de variadas seções de uma barragem. Permite também o cálculo do fator de segurança de um talude aplicando vários métodos, além de fornecer informações sobre as forças ativas e passivas atuantes e o momento de deslizamento para a maioria dos métodos aplicados. Já o software OptumG2 limita-se ao cálculo do fator de segurança de um talude aplicando apenas o MEF, informando dois valores para o fator de segurança (limites superior e inferior), além de apresentar uma interface menos intuitiva e requerer mais parâmetros de entrada para a realização das análises.

Por fim, conclui-se que barragens de terra de médio a grande porte devem ser monitoradas continuamente, por diversos instrumentos que reflitam o seu real comportamento, bem como realizadas simulações para avaliar a estabilidade de seus taludes, a fim de garantir a sua segurança, buscando tomar as ações pertinentes para evitar prejuízos ou perdas desnecessárias.

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se a realização da análise de estabilidade do talude de montante para a fase de rebaixamento rápido (fase mais crítica para o talude de montante) e a utilização de outros softwares disponíveis no mercado para efeito comparativo.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência nacional de energia elétrica. **Relatório de classificação das barragens ciclo 2019**. 2020. Brasília, DF. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023 Versão corrigida 2: 2020: Informação e documentação – Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro, 2020.

ENGWHERE. **Barragem de terra e barragem de enrocamento**. 25 set 2018. Fotografia. Disponível em: <https://www.engwhere.com.br/barragem-de-aterro-e-barragem-de-enrocamento/>. Acesso em: 28/02/2021.

FERNANDES, Marcela. **O que é uma barragem de rejeitos de mineração? E a lama, o que é?** 9 fev 2019. Fotografia. Disponível em: <https://segredosdomundo.r7.com/o-que-e-uma-barragem-de-rejeitos-de-mineracao-e-a-lama-o-que-e/>. Acesso em: 28/02/2021.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FUSARO, Teresa Cristina. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de emborcação e piaú**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GRUPO GOIÁS IMPERMEABILIZAÇÕES. **Barragens de água em seus tipos e utilizações**. 2013. Fotografia. Disponível em: <https://goiasimpermeabilizacoes.com.br/construcao/barragens-de-agua-em-seus-tipos-e-utilizacoes/>. Acesso em: 28/02/2021.

KALUME, Cecília Lira de Carvalho. **Análise de estabilidade dos taludes de uma barragem homogênea utilizando os softwares GeoStudio e Geo5**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Civil). Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.

MARANGON, Márcio. **Notas de aula da disciplina Geotecnia de Fundações e Obras de Terra**. 2018. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, 2018.

MARANGON, Márcio. **Notas de aula da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. 2004. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, 2004.

OFICINA DE TEXTOS. **Conheça todos os tipos de barragens**. Fotografia. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>. Acesso em: 28/02/2021.

OLIVEIRA, Adele Santos de. **Monitoramento geotécnico de barragem de terra de uma Pequena Central Hidrelétrica – PCH**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Civil). Centro Universitário Una, Contagem, 2019.

PIRES, L. C. S. **Notas de aula da disciplina Barragens de Terra e Enrocamento**. 2016. Faculdade do Noroeste de Minas (FINOM), Patos de Minas, 2016.

RMA 18, Relatório mensal de andamento. DESO. 2021. Aracaju, SE. 2021.

RMA 21, Relatório mensal de andamento. DESO. 2021. Aracaju, SE. 2021.

SANTOS, Daniel Cruz. **Estudo do comportamento de barragens de terra em modelos reduzidos por meio da utilização da bancada de permeabilidade**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, Aracaju, 2019.

SERHMA – SEDURBS. Secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Meio Ambiente. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Sustentabilidade. 2021.

SMIDERLE, Camila de Souza Dahm. **Segurança de barragens: Análise da instrumentação da barragem de Itaúba**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TEIXEIRA, Washington Luiz e. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique**

de sant llorenç de montgai - Espanha. 2013. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

VERÓL, Aline Pires. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

WYDE. **Piezômetro casagrande (PZ) / indicador de nível d'água (INA).** Fotografia. Disponível em: <https://www.wyde.com.br/servicos/instrumentacao-e-monitoramento-geotecnico/piezometro-casagrande-pz-indicador-de-nivel-d-agua-ina>. Acesso em: 28/02/2021.