

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

THAMMY FERREIRA DA SILVA

**MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

**Caçapava do Sul
2024**

THAMMY FERREIRA DA SILVA

**MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas.

**Caçapava do Sul
2024**

THAMMY FERREIRA DA SILVA

**MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de graduação em
Engenharia Ambiental e Sanitária, da
Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez
Rojas.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05 de julho de 2024.
Banca examinadora:

Prof. Dr. José Waldomiro Rojas
Orientador
UNIPAMPA

Profa. Dra Mayara Bitencourt Leão
UNIPAMPA

Téc. Msc. Lenon Melo Ilha
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 12/07/2024, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAYARA BITENCOURT LEAO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2024, às 17:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 15/07/2024, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1489219** e o código CRC **7929BD70**.

“A vida de quem inventa de voar é paradoxal”

Vilmar Becker

RESUMO

A engenharia geotécnica e a gestão hídrica são essenciais para a preservação da integridade das barragens. O presente estudo aborda o monitoramento da integridade e estabilidade de uma barragem de terra em Caçapava do Sul (RS) por meio das aplicações de métodos geofísicos, com ênfase nos métodos de eletrorresistividade e georadar (GPR). O objetivo central é realizar uma avaliação da integridade da barragem, utilizando técnicas não invasivas para investigar as características subsuperficiais do solo. A Eletrorresistividade é empregada para mapear a distribuição de resistividade elétrica, permitindo a identificação de zonas saturadas e avaliação da uniformidade do solo. Paralelamente, o Georadar mapeia as camadas subsuperficiais, detectando anomalias e fornecendo informações sobre a geometria e estrutura interna. A avaliação foi realizada através da investigação geofísica e análise de estabilidade. Foram realizadas visitas técnicas no local da barragem, executados perfis geofísicos investigativos através do método de eletrorresistividade e georadar. A análise da estabilidade do talude foi produzida utilizando os métodos de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado por meio do *software* Hyrcan. Os parâmetros utilizados na modelagem foram baseados nos resultados mais críticos, sob condições naturais, obtidos a partir dos ensaios geotécnicos de solo e parâmetros técnicos de geometria do maciço, criando-se duas outras condições para análise. Dessa forma, os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta é satisfatória. As análises geofísicas revelaram anomalias significativas, como zonas de baixa resistividade indicando solo saturado ou argilas, e áreas de alta resistividade sugerindo substrato rochoso. Foram identificadas fraturas, heterogeneidades e zonas de alta umidade, que são críticas para a integridade da barragem devido ao potencial de infiltração de água e erosão interna. No que se refere ao fator de segurança, nenhum dos modelos gerados a partir dos métodos de Bishop e Janbu apresentou o valor mínimo exigido na norma vigente. Por esse motivo, aconselha-se que estudos mais robustos continuem sendo realizados no local.

Palavras-chave: Engenharia geotécnica; barragem; anomalias geofísicas; eletrorresistividade; georadar.

ABSTRACT

Geotechnical engineering and water management are essential for the preservation of dam integrity. This study addresses the monitoring of the integrity and stability of an earth dam in Caçapava do Sul (RS) through the application of geophysical methods, with an emphasis on resistivity and GPR (Ground Penetrating Radar) methods. The central objective is to evaluate the integrity of the dam using non-invasive techniques to investigate the subsurface characteristics of the soil. Resistivity is employed to map the distribution of electrical resistivity, allowing for the identification of saturated zones and the assessment of soil uniformity. In parallel, the Ground Penetrating Radar maps the subsurface layers, detecting anomalies and providing information on the geometry and internal structure. The assessment was carried out through geophysical investigation and stability analysis. Technical visits were conducted at the dam site, and investigative geophysical profiles were executed using the resistivity and Ground Penetrating Radar methods. The slope stability analysis was produced using the Simplified Bishop and Simplified Janbu methods through the Hyrcan software. The parameters used in the modeling were based on the most critical results, under natural conditions, obtained from geotechnical soil tests and technical parameters of the massif geometry, creating two other conditions for analysis. Thus, the results obtained showed that the proposed methodology is satisfactory. Geophysical analyses revealed significant anomalies, such as low resistivity zones indicating saturated soil or clays, and high resistivity areas suggesting rocky substrate. Fractures, heterogeneities, and high moisture zones were identified, which are critical for the dam's integrity due to the potential for water infiltration and internal erosion. Regarding the safety factor, none of the models generated from the Bishop and Janbu methods presented the minimum value required by current standards. For this reason, it is advised that studies continue to be conducted on site.

Keywords: Geotechnical engineering; dam; geophysical anomalies; resistivity; Ground Penetrating Radar.

AGRADECIMENTOS

Escrevo estas palavras com o coração transbordando de gratidão e felicidade.

Agradeço aos meus pais, cada passo desta jornada foi marcado pela lembrança constante do amor e do apoio que sempre me deram. A distância física nunca foi fácil, mas saber que cada conquista minha é motivo de orgulho para vocês tornou cada desafio mais leve e cada vitória mais significativa. Vocês são minha inspiração eterna.

Ao meu eterno veterano, agradeço pelos conselhos sábios e pelo acolhimento não apenas na faculdade, mas também na vida. Suas orientações foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

E ao meu querido capixaba favorito, agradeço por trazer tranquilidade aos momentos turbulentos, por encorajar-me em cada obstáculo e por tornar esta jornada muito mais prazerosa. Sua presença foi um presente que valorizei a cada passo do caminho.

A todos vocês, meu mais profundo obrigada. Cada um contribuiu de maneira única para esta conquista. Amo vocês!

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais elementos de uma barragem de terra homogênea.....	13
Figura 2 - Principais elementos de uma barragem de terra zoneada.....	14
Figura 3 - Estrutura inicial de uma barragem a jusante.....	15
Figura 4 - Barramento a Jusante.....	15
Figura 5 - Estrutura inicial do barramento a Montante.....	16
Figura 6 - Barramento a Montante.....	16
Figura 7- Barramento pelo método de Linha de Centro.....	17
Figura 8 - Diagrama ternário textural.....	21
Figura 9 - Decomposição da força P.....	27
Figura 10 - Principais Métodos Geofísicos.....	28
Figura 11 - Mapa de localização da área de estudo.....	36
Figura 12 - Médias mensais de precipitação em Caçapava do Sul,RS (período de 1976 - 2005).....	37
Figura 13 - Chuva acumulada em Caçapava do Sul (período de janeiro a junho de 2024).....	38
Figura 14- Mapa de drenagem de Caçapava do Sul.....	40
Figura 15 -Mapa de localização dos perfis de eletrorresistividade e GPR.....	42
Figura 16 - (A)Equipamento Syscal (B) Conexão dos eletrodos.....	43
Figura 17- (A)Equipamento IDS Instruments (B)Funcionamento do georadar.....	44
Figura 18 - Geometria da barragem.....	46
Figura 19 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 1).....	48
Figura 20 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 2).....	50
Figura 21 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 3).....	52
Figura 22 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 4).....	54
Figura 23 - Perfil de georadar (Linha 1).....	57
Figura 24 - Perfil de georadar (Linha 2).....	59
Figura 25 - Perfil de georadar (Linha 3).....	61
Figura 26 - Perfil de georadar (Linha 4).....	63
Figura 27 - Fator de segurança Bishop da condição 1.....	66
Figura 28 - Fator de segurança Janbu da condição 1.....	67
Figura 29 - Fator de segurança Bishop da condição 2.....	68

Figura 30 - Fator de segurança Janbu da condição 2.....	69
Figura 31 - Comparação perfil 1 (a) 2021 (b) 2024.....	71
Figura 32 - Comparação perfil 2 (a) 2021 (b) 2024.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	26
Tabela 2 - Classificação Litológica Baseada na Resistividade.....	29
Tabela 3 - Parâmetros adotados para análise de estabilidade do talude na barragem.....	46
Tabela 4 - Parâmetros para a fundação.....	46
Tabela 5 - Comparação dos fatores de segurança.....	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
3. JUSTIFICATIVA.....	16
4. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	17
4.1 BARRAGENS.....	17
4.2 TIPOS DE BARRAGEM.....	18
4.2.1 Barragem de terra.....	18
4.2.1.1 Barragem homogênea.....	18
4.2.1.2 Barragem zoneada.....	20
4.3 METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS PARA BARRAGENS.....	21
4.3.1 Método jusante.....	21
4.3.2 Método montante.....	22
4.3.3 Método linha de centro.....	23
4.4 PRINCIPAIS MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGEM.....	24
4.4.1 Ruptura por erosão interna (piping).....	24
4.4.2 Ruptura por galgamento.....	24
4.4.3 Ruptura por liquefação.....	25
4.4.4 Ruptura por perda de estabilidade.....	25
4.5 LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	25
4.6 A BARRAGEM DA FONTE DO MATO E PESQUISAS ANTERIORES.....	27
4.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	28
4.7.1 Métodos de análise de estabilidade.....	29
4.7.2 Fator de segurança.....	30
4.7.3 Métodos de equilíbrio limite e cálculo do fator de segurança.....	31
4.8 MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	32
4.8.1 Método de eletrorresistividade.....	33
4.8.2 Método GPR (Ground Penetrating Radar).....	34
4.8.3 Métodos e Aplicações em barragens.....	35
5. ÁREA DE ESTUDO.....	37
5.1 LOCALIZAÇÃO.....	37
5.2 CLIMA E CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO.....	39
5.3 CONTEXTO PEDOLÓGICO.....	40
5.4 HIDROLOGIA.....	41
6. METODOLOGIA.....	43
6.1 VISITA DE RECONHECIMENTO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
6.2 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO.....	43
6.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA DOS SOLOS.....	46
6.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE.....	46

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
7.1 ANÁLISE ELETORRESISTIVIDADE.....	49
7.2 ANÁLISE GEORADAR.....	57
7.3 FATOR DE SEGURANÇA.....	66
7.4 COMPARAÇÃO DOS DADOS.....	71
7.4.1 Eletorresistividade.....	71
7.4.2 Fator de segurança.....	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75

1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens de terra tem desempenhado um papel fundamental na infraestrutura global, fornecendo água potável, energia, controle de enchentes e recursos agrícolas essenciais. No entanto, a integridade e estabilidade dessas estruturas são questões críticas que demandam uma atenção rigorosa e constante. Desastres passados envolvendo barragens de terra ressaltaram a necessidade crucial de aprimorar os métodos de monitoramento e avaliação dessas estruturas, visando prevenir tragédias e proteger o meio ambiente.

Segundo Oliveira (2008), é de suma importância saber avaliar as condições de segurança das barragens. Porém, no Brasil, existe um grande número de barragens necessitando de reparos, sem nenhum acompanhamento técnico ou monitoramento. Então é necessário salientar a conscientização de vistoria e manutenção.

Os métodos geofísicos, como a resistividade elétrica, têm se mostrado eficazes na identificação de anomalias internas em barragens de terra, permitindo a detecção precoce de possíveis falhas estruturais (Almeida e Ferreira, 2010). O monitoramento geotécnico contínuo é essencial para garantir a segurança das barragens. Técnicas geofísicas, como a tomografia de resistividade elétrica, oferecem uma visão detalhada das condições internas das estruturas, possibilitando intervenções preventivas (Santos, 2013).

Visando abordar a problemática, ao longo deste estudo, investigaremos a aplicação prática de técnicas geofísicas, como a resistividade elétrica e o georadar na avaliação das condições das barragens. Examinaremos um exemplo real de caso em que essas técnicas revelaram informações importantes sobre a estrutura da barragem, possíveis deslizamentos de terra, saturação do solo e outros fatores de risco.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi investigar a integridade e monitorar a estabilidade de uma barragem de terra utilizando métodos geofísicos, visando contribuir para a identificação de possíveis riscos e aprimoramento das técnicas de monitoramento de estruturas geotécnicas. De forma mais específica,

busca-se realizar uma revisão sobre o tema, aplicar técnicas geofísicas e realizar uma correlação entre dados geofísicos e geotécnicos.

A utilização de métodos geofísicos na avaliação de barragens de terra não só auxilia na identificação de zonas de fraqueza e saturação, mas também contribui para a compreensão das dinâmicas internas da estrutura ao longo do tempo (Silva e Lima, 2015). As técnicas geofísicas proporcionam uma ferramenta não invasiva e eficaz para o monitoramento da estabilidade de barragens de terra, permitindo a detecção de mudanças nas propriedades do solo que podem indicar risco iminente de falhas (Costa e Andrade, 2017). O uso da resistividade elétrica no monitoramento de barragens tem demonstrado ser uma metodologia robusta para a identificação de áreas de alta saturação, que podem comprometer a integridade da estrutura e necessitam de atenção imediata (Pereira e Oliveira, 2019).

Com isso, ao combinar diferentes métodos de investigação, busca-se obter resultados para avaliar as condições estruturais das barragens e monitorar sua integridade. A utilização conjunta dessas investigações proporciona respostas que permitem discussões e avaliações mais embasadas, baseadas em critérios científicos que podem ser correlacionados entre si.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é investigar a integridade e a estabilidade de uma barragem de terra utilizando métodos geofísicos, visando contribuir para a identificação de possíveis riscos e para o aprimoramento das técnicas de monitoramento de estruturas geotécnicas.

Dentro do objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Investigar as camadas do subsolo e identificar anomalias que possam indicar problemas na barragem, através das análises geofísicas, como eletrorresistividade e GPR;
- b) Determinar o fator de segurança do talude, correlacionando dados geofísicos e geotécnicos;
- c) Classificar por meio da análise dos dados obtidos o grau de estabilidade da barragem para condições climáticas distintas.

3. JUSTIFICATIVA

Preservar a integridade e a estabilidade das barragens de terra é de fundamental importância no contexto da engenharia geotécnica e da gestão dos recursos hídricos. Estas estruturas desempenham um papel crucial na prevenção de inundações, garantindo o abastecimento de água e protegendo o ambiente. Contudo, a manutenção da segurança destas barragens deve ser uma preocupação constante, pois, se negligenciadas, podem resultar em catástrofes ambientais e humanas, como observado em eventos passados.

Neste contexto, a aplicação de métodos geofísicos para avaliar a integridade e monitoramento de barragens surge como uma abordagem promissora. Estes métodos permitem obter informações precisas sobre a estrutura, condições do solo sob e ao redor da barragem, sem necessidade de intervenção intrusiva.

Diversos estudos já publicados mostram o potencial dos métodos geofísicos na obtenção de dados sobre essas estruturas e com isso tem se tornando promissores na área da engenharia ambiental e civil.

Assim, esta pesquisa contribui para o fortalecimento da cultura de prevenção e monitoramento de barragens. É nesse contexto de relevância ambiental e científica que justificamos a importância deste trabalho.

4. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

4.1 BARRAGENS

A Lei 12.334/10 – Política Nacional de Segurança de Barragens, define que “as barragens são qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

Para uma melhor compreensão, é fundamental conhecer as principais componentes estruturais das barragens, tais como:

- ❖ Barramento: o barramento é a estrutura principal de retenção, podendo ser composto por diversas técnicas construtivas.
- ❖ Crista: a crista é a parte superior da barragem. Sua largura é determinada pelo nível de tráfego sobre ela, mas, nunca deve ser inferior a 3 metros. A altura da barragem deve ser no mínimo igual ao nível máximo da água somado a borda livre definida em projeto para aquela barragem.
- ❖ Borda livre: é a distância vertical entre a crista e o nível máximo do reservatório, ela faz parte da segurança contra o transbordamento.
- ❖ Taludes de montante e jusante: Talude de montante é a parte da barragem que ficará diretamente em contato com a água, desse modo necessita de cuidados especiais na sua manutenção. O talude de jusante é o lado oposto ao de montante.
- ❖ Ombreiras ou encontros: são pontos de contato entre a barragem e o terreno natural, esses pontos costumam ser mais sensíveis em termos de resistência a ações erosivas.
- ❖ Vertedouros: são estruturas hidráulicas que servem para controlar o nível do reservatório, permitindo o fluxo de água da montante para jusante.
- ❖ Fundação: é a base na qual a barragem se apoiará e para qual devem ser estudados os efeitos das forças aplicadas sobre a barragem

4.2 TIPOS DE BARRAGEM

De acordo com Gaioto (2003), as barragens podem ser classificadas de diferentes formas dependendo da finalidade, assim a mais usual, é a partir do seu material construtivo, assim as barragens convencionais são divididas em quatro tipos:

- a) Terra
- b) Enrocamento
- c) Concreto
- d) Mista

4.2.1 Barragem de terra

As barragens de terra são construídas com materiais naturais, como solo e rocha, compactados em camadas. A literatura aborda métodos de compactação, controle de erosão e revestimento de superfície em barragens de terra. Segundo Vargas (1997), no início do Século XX, as primeiras barragens de terras brasileiras foram construídas no Nordeste, pelo plano de obras de combate à seca e projetadas com base no empirismo.

Conforme Costa (2012, p. 24) , as barragens de terras são classificadas em dois tipos: homogêneas e zoneadas.

- a) homogêneas: quando há predominância de um único material
- b) zoneadas: existência de zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais.

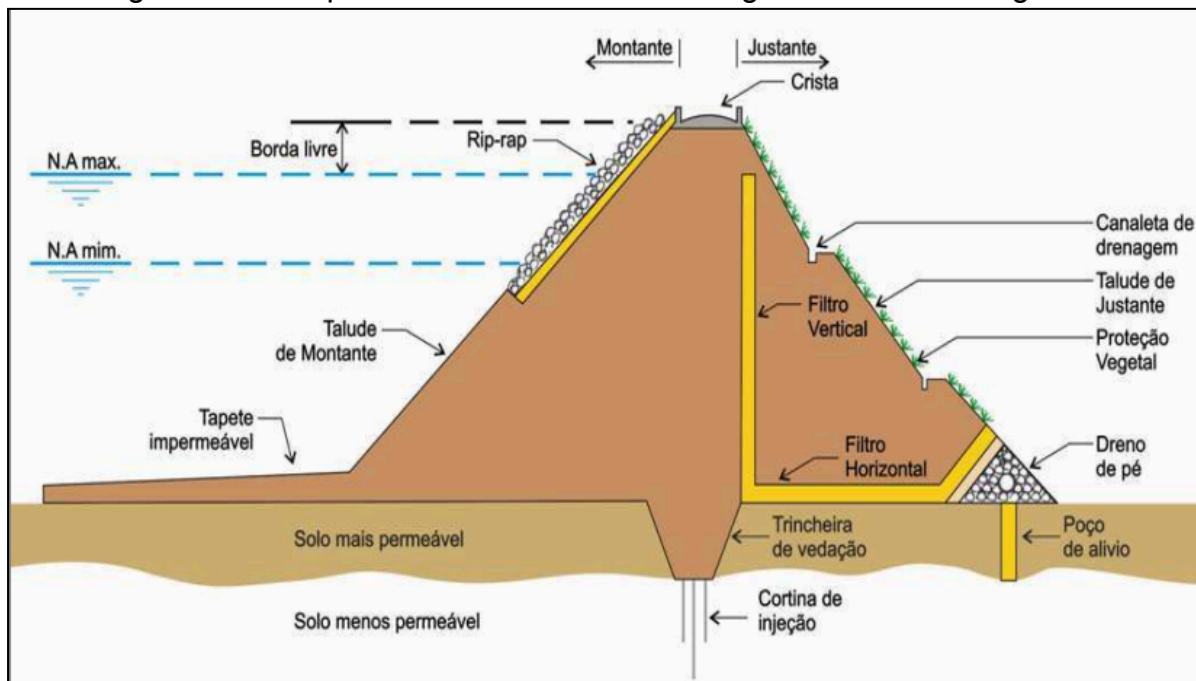
4.2.1.1 Barragem homogênea

A literatura descreve as técnicas de construção de barragens de terra homogêneas, que envolvem o uso de materiais naturais, como solo ou rocha, compactados em camadas sucessivas. Na figura 1 apresenta uma barragem de terra homogênea. Segundo Carvalho (2011) uma barragem de terra apresenta alguns elementos básicos em sua constituição.

- ❖ Rip-rap: proteção do talude de montante contra a ação das ondas e intempéries;
- ❖ Trincheira de vedação (*cut-off*): vala construída no eixo do maciço e preenchida com solo de baixa permeabilidade, devidamente compactado. Tem a finalidade de evitar o fluxo de água subterrâneo sobre a barragem;
- ❖ Filtro: constituído de areia ou material com granulometria adequada para evitar o carreamento de material granular do solo. Há o filtro vertical que tem a função de baixar a linha freática, encaminhando o fluxo para a base do aterro, evitando o seu aparecimento na face do talude de jusante e o horizontal que recebe o fluxo interrompido pelo filtro vertical e encaminha a água percolada para o dreno de pé (MASSAD, 2010);
- ❖ Dreno de pé: capta toda a água percolada através dos filtros (vertical e/ou horizontal), conduzindo-a ao curso d'água à jusante da barragem. Corresponde a uma seção de enrocamento construído com rochas de granulometria variada em transição
- ❖ Cortina de injeção: trata-se de injeção de material impermeável (cimento, silicatos ou resinas) abaixo da trincheira de vedação nas falhas ou fissuras caso a fundação ainda apresente permeabilidade elevada;
- ❖ Poços de alívio: são furos de drenagem abertos no terreno, com o objetivo de reduzir as subpressões desenvolvidas pela percolação de água na fundação;
- ❖ Tapete impermeável: estrutura construída em material impermeável e conectada à seção impermeável da barragem com o objetivo de diminuir a percolação de água através da fundação;
- ❖ Sistema de drenagem das águas pluviais: estruturas localizada na crista e nos taludes que coletam e transportam a água das chuvas, evitando a erosão dos mesmos.

Nas figuras 1 e 2 estão representados diferentes tipos de barragens, onde são identificados os elementos básicos de sua estrutura.

Figura 1 - Principais elementos de uma barragem de terra homogênea.

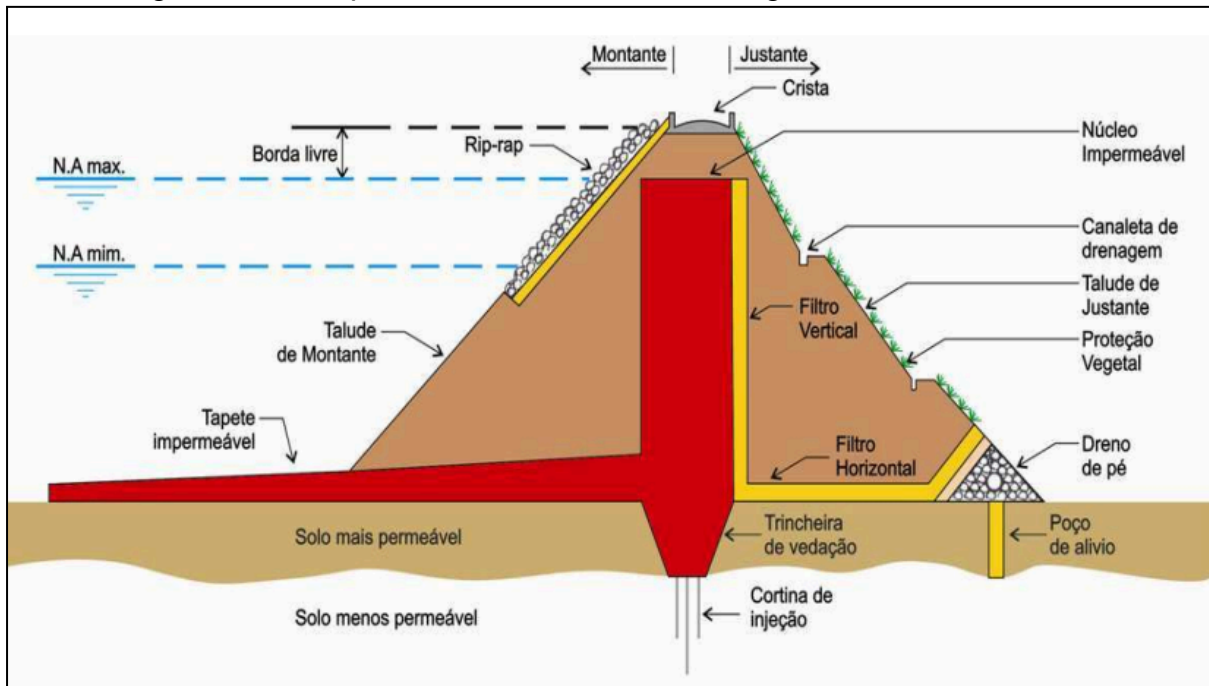


Fonte: Carvalho, 2011.

4.2.1.2 Barragem zoneada

A revisão explica o conceito de barragens de terra zoneadas, onde diferentes zonas de material com diferentes características são usadas em diferentes partes da barragem. As zonas incluem a zona do núcleo, a zona de filtro e a zona de revestimento, cada uma com funções específicas. Na figura 2 apresenta uma barragem de terra homogênea.

Figura 2 - Principais elementos de uma barragem de terra zoneada.



Fonte: Carvalho, 2011.

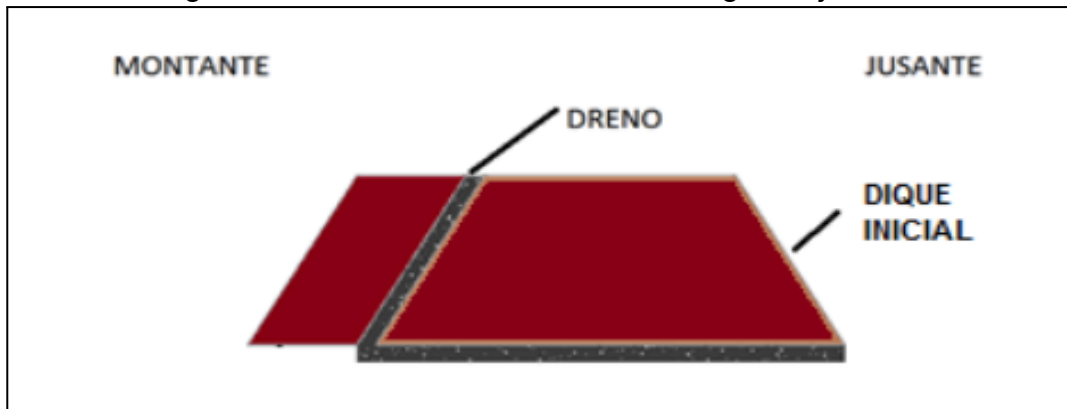
4.3 METODOLOGIAS CONSTRUTIVAS PARA BARRAGENS

As metodologias construtivas de barragens referem-se aos métodos e técnicas utilizados na construção de barragens. A escolha do modelo construtivo depende de diversos fatores, incluindo as condições geológicas e topográficas do local.

4.3.1 Método jusante

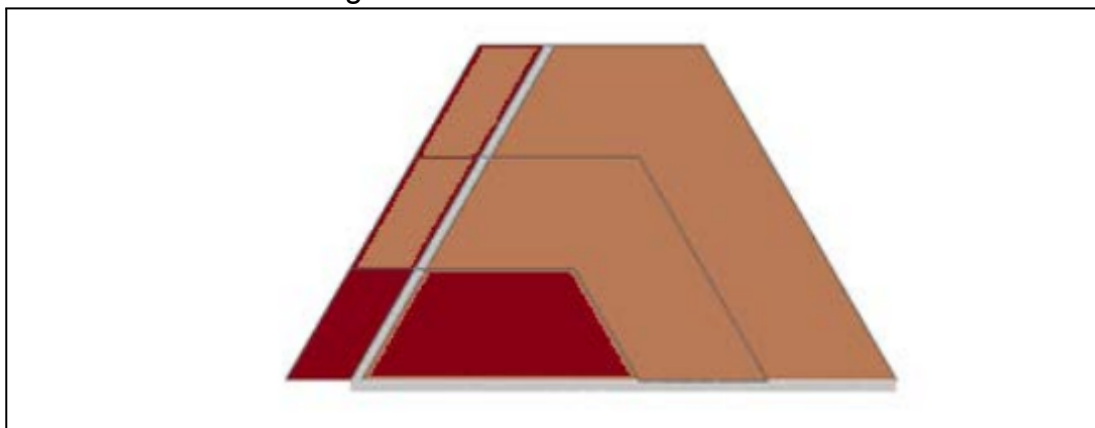
Sua construção e alteamento do barramento são sempre à jusante. Na figura 3 observamos o esquema de uma barragem a jusante e na figura 4 os alteamentos. Este método tem como vantagem, maior segurança por alteamento controlado, menor probabilidade de entubamento e rupturas horizontais, então como consequência a maior resistência ao cisalhamento e compactação de todo o corpo da barragem. E por desvantagens tem o custo elevado, menor velocidade de alteamento da barragem e maior volume de material a ser movimentado e compactado. (Soares, 2010).

Figura 3 - Estrutura inicial de uma barragem a jusante



Fonte: Cardozo, Pimenta & Zingano (2016)

Figura 4 - Barramento a Jusante



Fonte: Cardozo, Pimenta & Zingano (2016)

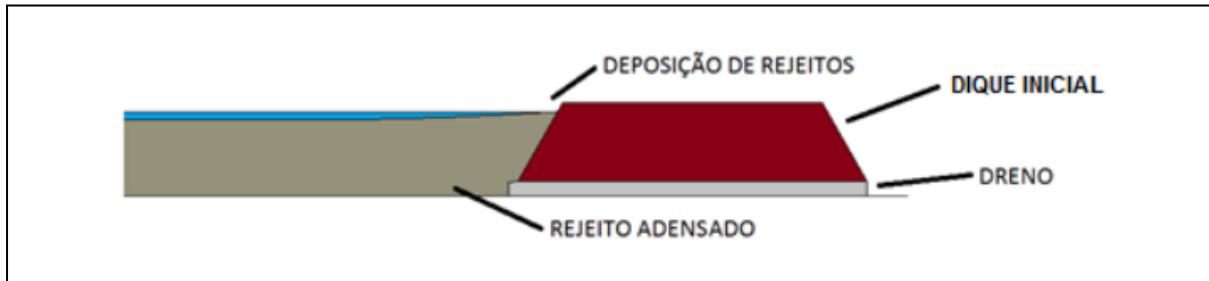
4.3.2 Método montante

Sua construção e alteamento do barramento são sempre à montante. Na figura 5 observamos o esquema de uma barragem à montante e na figura 6 os alteamentos.

Esse método é o mais antigo e mais empregado na atualidade e tem como vantagem o menor custo de construção, maior velocidade de alteamento, menores volumes na etapa de alteamento e pode ser utilizado onde há restrição de área. Porém há menor coeficiente de segurança, em função da linha freática e suscetibilidade à liquefação. (Soares, 2010). A Lei 23.291/19 de Minas Gerais proíbe a construção e ampliação de barragens a montante no estado, visando prevenir

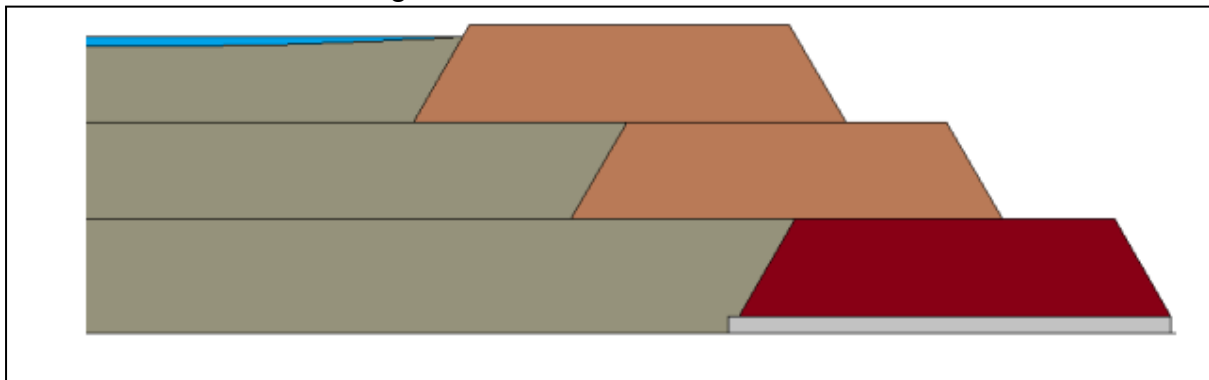
desastres e aumentar a segurança das barragens existentes. Esta medida foi adotada após graves incidentes de rompimento de barragens.

Figura 5 - Estrutura inicial do barramento a Montante



Fonte: Cardozo, Pimenta & Zingano (2016)

Figura 6 - Barramento a Montante



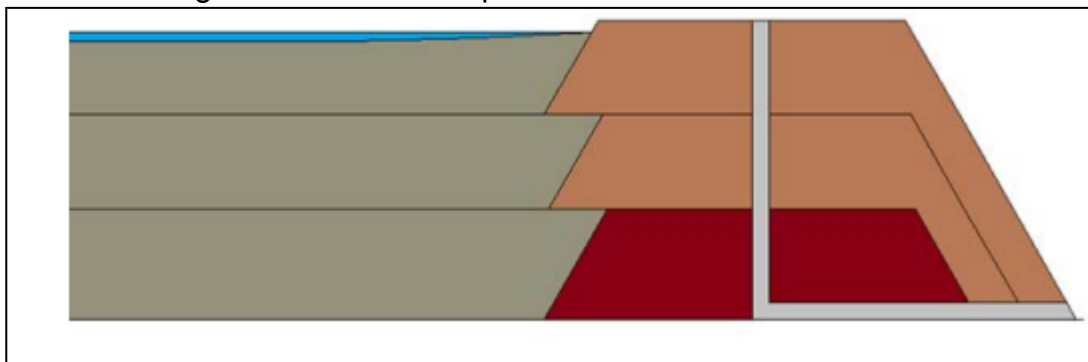
Fonte: Cardozo, Pimenta & Zingano (2016)

4.3.3 Método linha de centro

Consiste na sua construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, acompanhando um eixo vertical, o que é chamado de eixo vertical. Exemplificado na figura 7.

Por sua vez, este método é uma variação do método de jusante, as principais vantagens destacam-se a facilidade construtiva, o material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimos e as principais desvantagens deste método é a necessidade de um eficiente sistema de drenagem (Soares, 2010).

Figura 7- Barramento pelo método de Linha de Centro



Fonte: Cardozo, Pimenta & Zingano (2016)

4.4 PRINCIPAIS MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGEM

4.4.1 Ruptura por erosão interna (*piping*)

A erosão interna, também conhecida como *piping*, é um processo no qual um tubo de escoamento preferencial, chamado de entubamento, se forma devido à percolação da água. Falhas resultantes do *piping* são consequências da erosão regressiva, na qual um tubo se desenvolve no interior do maciço do solo compactado de montante para jusante, devido ao carreamento de partículas. Conforme a água se desloca pelo solo compactado, esse tubo gradualmente aumenta seu diâmetro, levando, eventualmente, ao colapso da estrutura (LADEIRA, 2007).

4.4.2 Ruptura por galgamento

O galgamento, também conhecido como *overtopping*, ocorre quando a água ultrapassa a altura do coroamento da barragem, sendo desencadeado pelas ondas geradas no reservatório devido a inundações ou eventos sísmicos. Processos como a erosão do material na base da barragem e cortes profundos no coroamento podem criar uma área vulnerável, levando ao colapso total da barragem. Isso significa que o modo de falha por corte em profundidade pode progredir até atingir a base do aterro (JÓNATAS, 2013).

4.4.3 Ruptura por liquefação

A liquefação pode ser definida como a súbita perda de capacidade de resistência ao cisalhamento. Esse fenômeno ocorre em solos não coesivos, quando saturados e submetidos a carregamentos não drenados (FREIRE NETO, 2009).

Conforme Coutinho (2018), essa ocorrência se manifesta em áreas amplas de solo, afetando não somente uma superfície de falha específica, e desencadeando deformações significativas junto com diversos mecanismos de ruptura.

4.4.4 Ruptura por perda de estabilidade

Através da presença de um talude, seja ele de origem natural ou construído, a inclinação natural do talude é o seu movimento de deslizamento, que, por sua vez, é impedido quando as tensões de cisalhamento envolvidas são iguais ou inferiores à resistência ao cisalhamento do material localizado ao longo da superfície de ruptura (REZENDE, 2003).

4.5 LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

A Lei 12.334 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esta lei é destinada a acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária que apresentem ao menos uma das especificações a seguir, conforme:

I - altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros; (Redação dada pela Lei nº 14.066, de 2020)

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei; (Redação dada pela Lei nº 14.066, de 2020)

V - categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei. (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020)

O DAEE é o órgão responsável pela fiscalização e segurança das barragens, que através da Portaria DAEE nº 3318, de 30 de maio de 2022 define em seus capítulos, aspectos gerais, classificação à categoria de risco, plano de elaboração e apresentação de segurança de barragens.

Dentro delas se destacam o capítulo IV que refere-se a Revisão Periódica de Segurança de Barragens do Conteúdo e Periodicidade, conforme:

Artigo 16 - A Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB), parte integrante do Plano de Segurança da Barragem, tem por objetivo verificar o estado geral de segurança da barragem, considerando o atual estado da arte para os critérios de projeto, a atualização de dados hidrológicos e as alterações das condições a montante e a jusante da barragem;

§ 1º – A Revisão Periódica, de que trata o “caput” deste artigo, deverá ser apresentada no Volume IV do PSB, conforme especificado no Anexo III desta Portaria, e inserida no SISB-DAEE até a data limite estabelecida para sua apresentação;

§ 2º - A Revisão Periódica do PSB SIMPLES deverá ser apresentada como uma reedição atualizada deste.

Artigo 17- A periodicidade para a Revisão Periódica de Segurança de Barragem é definida em função da Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial

Associado, constante do Anexo II, tendo os seguintes prazos:

I. Classe A: a cada 4 (quatro) anos;

II. Classe B: a cada 6 (seis) anos;

III. Classe C: a cada 8 (oito) anos;

IV. Classe D: a cada 10 (dez) anos.

Parágrafo Único – Para novas barragens, caso na fase de enchimento do reservatório ocorra algum incidente ou acidente com a barragem, a primeira Revisão Periódica deverá ser realizada imediatamente após sua conclusão.

4.6 A BARRAGEM DA FONTE DO MATO E PESQUISAS ANTERIORES

A barragem da Fonte do Mato já foi alvo de alguns estudos multidisciplinares, oferecendo uma base sólida para o presente estudo, contribuindo para a preservação sustentável desse recurso hídrico e da estrutura da barragem. Assim, podendo ser observado:

No trabalho de conclusão de curso de Miranda (2021), se baseou em uma abordagem multidisciplinar, combinando ensaios geotécnicos de solo, investigação geofísica e análise de estabilidade. Visitas técnicas foram realizadas no local da barragem, e perfis geofísicos foram executados usando o método de eletrorresistividade. Amostras de solo foram coletadas para diversos ensaios geotécnicos, incluindo granulometria, limite de liquidez e cisalhamento direto.

Neste trabalho a análise de estabilidade do talude foi conduzida utilizando o método de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado, com o suporte do *software* Slide2 da Rocscience versão 2021. Os parâmetros utilizados na modelagem foram baseados nos resultados mais críticos obtidos a partir dos ensaios geotécnicos e de parâmetros técnicos de geometria do maciço em condições naturais.

Os resultados indicaram que a metodologia adotada foi satisfatória, com os produtos das investigações geofísicas não apresentando anomalias significativas, exceto em uma região próxima ao possível contato entre o terreno natural e o vertedouro de concreto, onde há propensão à infiltração de água e ao desenvolvimento de patologias no maciço. No entanto, em relação ao fator de segurança, o modelo gerado pelo método Janbu não atendeu ao valor mínimo

exigido pela norma vigente, sugerindo a necessidade de novos estudos e análises no local para garantir a segurança da barragem.

Já o objetivo do trabalho de conclusão de curso de Carminatti (2023), tem o foco na poluição dos recursos hídricos, especialmente na Barragem da Fonte do Mato e seus afluentes. O estudo ambiental prévio incluiu análises de água, delimitação de áreas de preservação, identificação de zonas de risco de declividade, estudo de uso e ocupação do solo, e delimitação da microbacia e do Arroio da Fonte do Mato, utilizando sensoriamento remoto e sistemas geográficos de informação.

Os resultados indicaram que na barragem, os parâmetros cor aparente, pH e fósforo estão acima dos limites estipulados para a classe 3, conforme a Resolução 357 CONAMA. Evidenciou-se que a emissão de esgotos domésticos é a principal fonte de poluição, e que 60% das áreas de Áreas de Preservação Permanente (APP) do arroio estão preservadas, embora esse número seja subestimado. A ausência de APPs de altimetria na área da microbacia foi observada, e a maior parte da microbacia foi classificada como risco 2, de médio risco.

Ao final do trabalho foram discutidos os riscos associados à emissão de esgotos em corpos hídricos que abastecem comunidades, e são propostos estudos e medidas para melhorar a qualidade da água e da microbacia. A pesquisa destaca a importância de ações e intervenções para mitigar a poluição, preservar áreas de proteção e garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos na região estudada.

4.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Castro (2004) a análise de estabilidade de talude consiste em uma abordagem de grande magnitude de aplicações em obras geotécnicas. A ABNT NBR 11682 (ABNT, 2009) estabelece os requisitos essenciais para a avaliação e gestão da estabilidade de encostas e taludes. Esta norma fornece diretrizes estruturadas que abrangem, de forma sequencial, as diversas fases relacionadas à realização de estudos e controle, desde a concepção até a monitorização de maciços. As etapas delineadas incluem: procedimentos preliminares, investigações

geológicas e geotécnicas, desenvolvimento de projetos, execução de obras, supervisão das atividades, manutenção contínua e vigilância do comportamento do terreno.

4.7.1 Métodos de análise de estabilidade

De acordo com Franca (1997), a análise de estabilidade de taludes pode ser realizada através da:

- Análise determinística: Pode ser subdividida em tensão de formação e equilíbrio limite. No primeiro caso, os estudos de estabilidade são baseados em análise tensão x deformação baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) ou das Diferenças Finitas (MDF). No segundo caso, a análise é baseada no Equilíbrio Limite e consiste na determinação do equilíbrio de uma massa de solo, com uma geometria qualquer, embora as mais comumente analisadas sejam a poligonal e a circular. Por este método a ruptura ocorre ao longo de uma superfície previamente definida por tentativas.
- Análise probabilística: Análise expressa sob a forma de uma probabilidade ou risco de ruptura, devido à variabilidade dos parâmetros de resistência que controlam a estabilidade do talude.
- Modelagem numérica: onde os métodos de equilíbrio-limite podem não ser totalmente adequados nas análises de estabilidade por apresentarem: condições de contorno e iniciais complexas (carregamentos externos, tensões *in situ* etc.) comportamentos não lineares, anisotrópicos e heterogêneos dos materiais; geologia e geometrias complexas, com contrastes acentuados de deformabilidade entre as formações presentes no perfil do talude.

4.7.2 Fator de segurança

Para determinar o fator de segurança (FS), utilizamos os níveis de segurança desejados. A fórmula a seguir é uma forma mais específica de calcular o fator de segurança para a estabilidade de taludes, considerando os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

$$F_S = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento (S)}}{\text{Tensões atuantes } (\tau)} = \frac{(c' + \sigma' \text{tg } \phi')}{\tau}$$

Onde:

F_S = fator de segurança em relação à resistência

S = resistência ao cisalhamento do solo

τ = resistência média ao cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura

c' = coesão efetiva

σ' = tensão efetiva atuante no plano cisalhado

ϕ' = ângulo de atrito interno efetivo

Fonte: Miranda (2021)

A determinação do fator de segurança é baseada nos níveis desejados de segurança. Esses níveis podem ser subdivididos em dois aspectos cruciais: a segurança das vidas humanas e a proteção contra danos materiais e ambientais. A tabela 1 apresenta os valores de FS a serem empregados considerando deslizamentos e muros de contenção.

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,5	1,5
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: Modificado da ABNT, 2009.

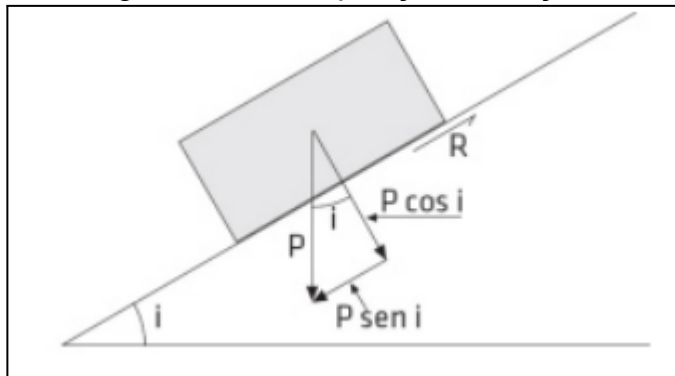
4.7.3 Métodos de equilíbrio limite e cálculo do fator de segurança

Massad (2010) diz que métodos de Equilíbrio-Limite consideram as seguintes hipóteses:

- O solo é um material que se rompe de forma brusca sem sofrer deformação;
- Utilização de valores médios de parâmetros de resistência;
- Material homogêneo e contínuo numa mesma camada;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência de ruptura, e
- O fator de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura.

A abordagem utilizando o método de equilíbrio-limite se baseia na consideração de um equilíbrio entre as forças que têm o potencial de induzir a ruptura ou movimento e as forças que oferecem resistência a esses efeitos. Ilustrando esse conceito, na Figura 9, é fornecido um exemplo em que um bloco é submetido à sua própria carga (P), com a componente tangencial ($P \cdot \sin i$) que tem o potencial de iniciar um movimento (FIORI, 2015).

Figura 9 - Decomposição da força P

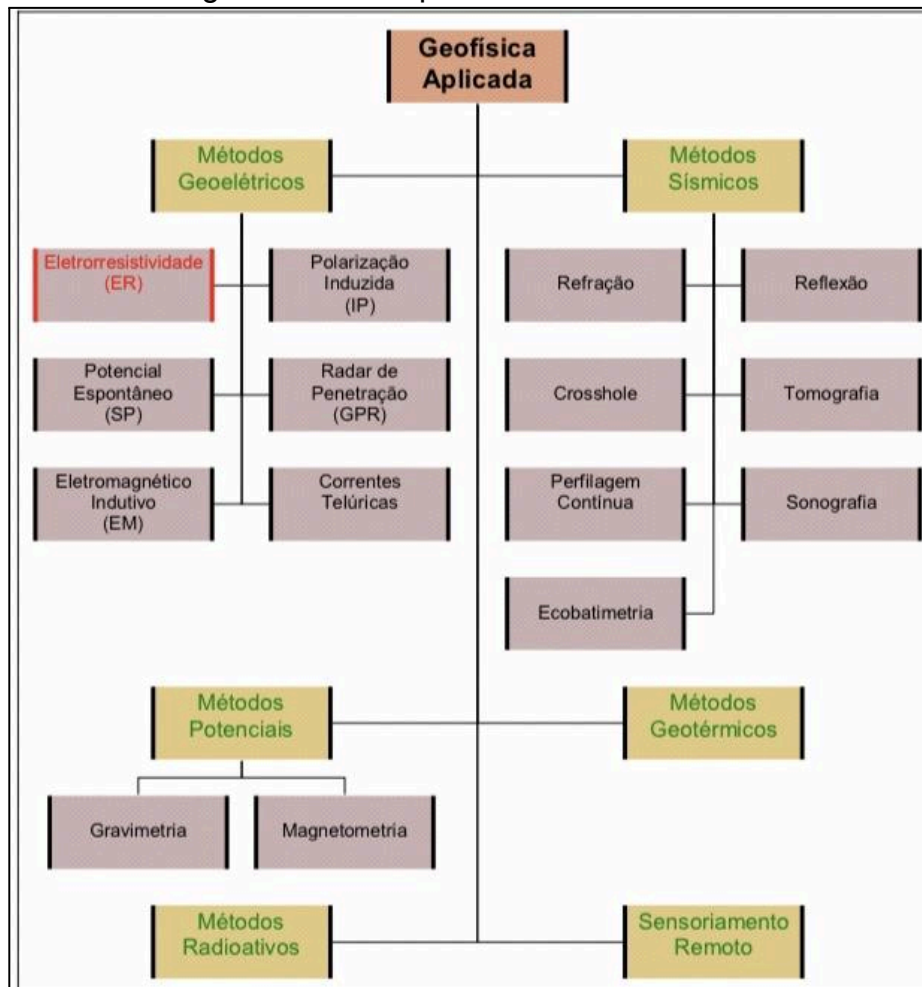


Fonte: Fiori (2015).

4.8 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Conforme a classificação de Telford et al. (1990), os métodos geofísicos são considerados como ferramentas abrangentes de exploração, sendo eles: Gravitacional, Magnético, Sísmico, Elétrico, Eletromagnético, Radioativo e Perfilagem de poço. A aplicação desses métodos tem como propósito a obtenção de informações sobre as características internas da subsuperfície, através da análise e interpretação da maneira como o objeto de investigação interage com os métodos geofísicos utilizados no terreno. Cada método responde a diferentes propriedades físicas do meio em estudo, assim sendo necessário observar qual método é potencialmente mais indicado que outros para um problema específico. Sendo possível observar na figura 10, um esquema onde mostra os principais métodos e seus derivados.

Figura 10 - Principais Métodos Geofísicos



Fonte:: BRAGA, 1997, p.4 e 2001, p.2; SHERIFF, 1989, p.3; SOUZA et al,1998, p.165

4.8.1 Método de eletrorresistividade

Segundo Telford et al. (1976), a técnica de resistividade é mais precisa que os outros métodos elétricos, porque os resultados quantitativos são obtidos usando uma fonte controlada de dimensões específicas. No método de eletrorresistividade, a ideia fundamental é obter informações sobre a forma das estruturas no subsolo e as resistividades elétricas associadas a elas por meio da medição de valores de potencial elétrico em vários pontos. A resistividade elétrica das rochas está relacionada aos mecanismos de condução elétrica nos materiais, com a condução eletrolítica nas soluções líquidas presentes nos poros das rochas sendo o mecanismo predominante. O método emprega a introdução de uma corrente elétrica, que pode ser contínua ou alternada, em baixa frequência (geralmente

inferior a 10 Hz), no solo por meio de dois eletrodos posicionados na superfície ou no interior do terreno. Isso resulta na redistribuição de cargas elétricas tanto na superfície quanto no volume do solo, criando e mantendo um campo elétrico artificial em torno dos eletrodos. Utilizando outros eletrodos, a diferença de potencial elétrico entre pontos distribuídos na região de estudo é medida (Silva, 2018).

De acordo com Reynolds (1997), são estabelecidos valores de referência para a interpretação geológica a partir das respostas de eletrorresistividade de diferentes materiais. Uma vez que os materiais possuem distintas propriedades físicas, eles também exibem respostas variadas à eletrorresistividade, a qual é quantificada em unidades de ohm.metro (ohm.m). A tabela 2 oferece uma classificação litológica com base na resistividade.

Tabela 2 - Classificação Litológica Baseada na Resistividade.

TIPO LITOLÓGICO	RESISTIVIDADE ($\Omega.M$)
Zona não saturada	100 a 30.000
Zona saturada	20 a 200
Basalto	10 a $1,3 \times 10^7$
Diabásio	200 a 5×10^7
Calcário	50 a 1×10^7
Gnaisse	3.000 a 5.000
Granito	5.000 a 1×10^6
Quartzo	$< 1 \times 10^6$

Fonte: Reynolds (1997)

4.8.2 Método GPR (Ground Penetrating Radar)

O Ground Penetrating Radar (GPR), também conhecido como Georadar é uma técnica que envolve a emissão e detecção de ondas eletromagnéticas em uma ampla faixa de frequência, variando de 1,0 a 2500 MHz, o que está na região de frequência das ondas de rádio de alta frequência no espectro eletromagnético. Este método se assemelha ao método sísmico de reflexão, embora eles se diferenciam

no tipo de onda que utilizam. O GPR se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas, enquanto o método sísmico se apoia nas ondas mecânicas, como explicado por Pestana e Botelho (1997).

Segundo Andrade (2010), a profundidade de investigação e a resolução do GPR são influenciadas pela frequência da antena e pela resistividade do meio. Resistividades baixas e frequências elevadas tendem a resultar em menor penetração. Contudo, frequências mais altas proporcionam uma discriminação superior dos materiais investigados, permitindo a visualização de alvos menores. Isso ocorre devido à relação entre a capacidade de discriminação e o comprimento de onda, que diminui com a frequência, mantendo uma determinada velocidade.

4.8.3 Métodos e Aplicações em barragens

Os métodos geofísicos são ferramentas valiosas para obter informações sobre as características geológicas e geotécnicas do subsolo, assim auxiliando nas questões relacionadas à segurança, modelos construtivos e manutenção dessas estruturas. Podemos analisar esses métodos geofísicos aplicados em alguns estudos em barragens, como observados em alguns trabalhos como:

Na tese de doutorado de Washington Teixeira (2013) foi realizado um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra, focando no caso específico do Dique de Sant Llorenç de Montgai, localizado na Espanha. A abordagem adotada utiliza métodos geofísicos para investigar a subsuperfície do solo, com ênfase em técnicas como eletrorresistividade e georadar. O objetivo principal foi analisar a percolação e a estabilidade do dique, empregando métodos não invasivos para avaliar as características do solo. Os resultados obtidos por meio desses métodos geofísicos foram essenciais para compreender o comportamento do solo, identificar potenciais problemas de percolação e garantir a estabilidade da barragem.

Em outro estudo, uma dissertação de mestrado, Marina Coura (2019) abordou a importância da monitorização de barragens, estruturas cruciais que armazenam grandes volumes de água ou rejeitos. Rupturas e acidentes, muitas vezes

decorrentes de erosão interna e galgamento, destacam a necessidade de cuidados na construção. O trabalho utilizou métodos geofísicos, especificamente eletrorresistividade e polarização induzida, integrados ao método geotécnico de permeabilidade do solo, para avaliar duas barragens em Cordeirópolis e Ipeúna (SP). Os resultados geofísicos, apresentados em seções 2D, destacaram zonas de baixa resistividade como áreas saturadas e suscetíveis à infiltração de água. Embora a polarização induzida tenha resultados menos satisfatórios, sua aquisição conjunta é considerada para complementar o estudo. Os resultados geotécnicos indicaram baixa permeabilidade do solo, reforçando sua adequação para a construção das barragens.

5. ÁREA DE ESTUDO

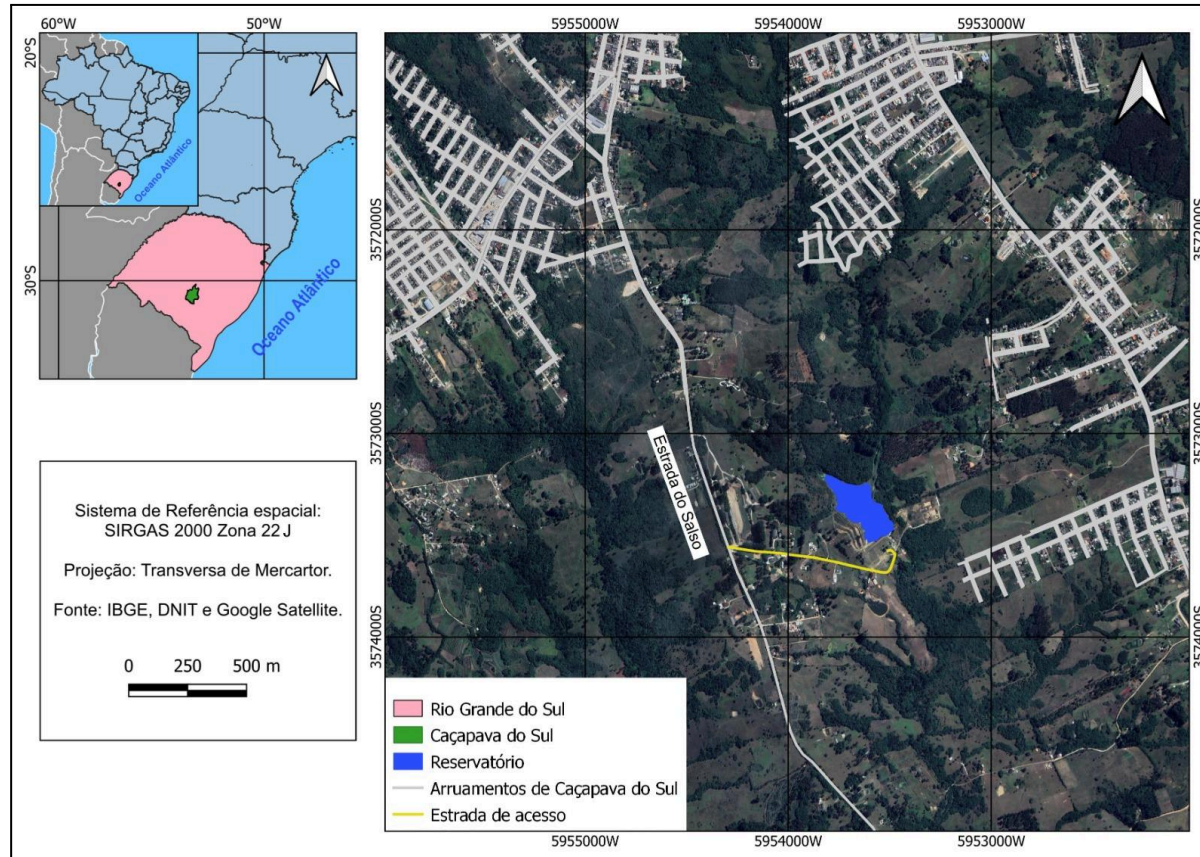
Nos tópicos seguintes serão abordados aspectos relacionados a área de estudo.

5.1 LOCALIZAÇÃO

A barragem está localizada no município de Caçapava do Sul na Mesorregião Sudeste Rio Grandense e na Microrregião da Serra do Sudeste do Estado do Rio Grande do Sul. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município ocupa uma área de 3.047,126 Km², com uma população residente de 32.515 habitantes e densidade demográfica de 10.67 hab/km² e aproximadamente 260 km distante da capital Porto Alegre.

Mais precisamente, a barragem localiza-se a 5.0 km da área urbana de Caçapava do Sul e aproximadamente a 8.0 km da Universidade Federal do Pampa, o acesso como mostrado na figura 11, se dá através da Estrada do Salso, localizada dentro do empreendimento da Corsan, barragem que foi concluída no ano de 1991, a fim de fornecer armazenamento a cidade.

Figura 11 - Mapa de localização da área de estudo



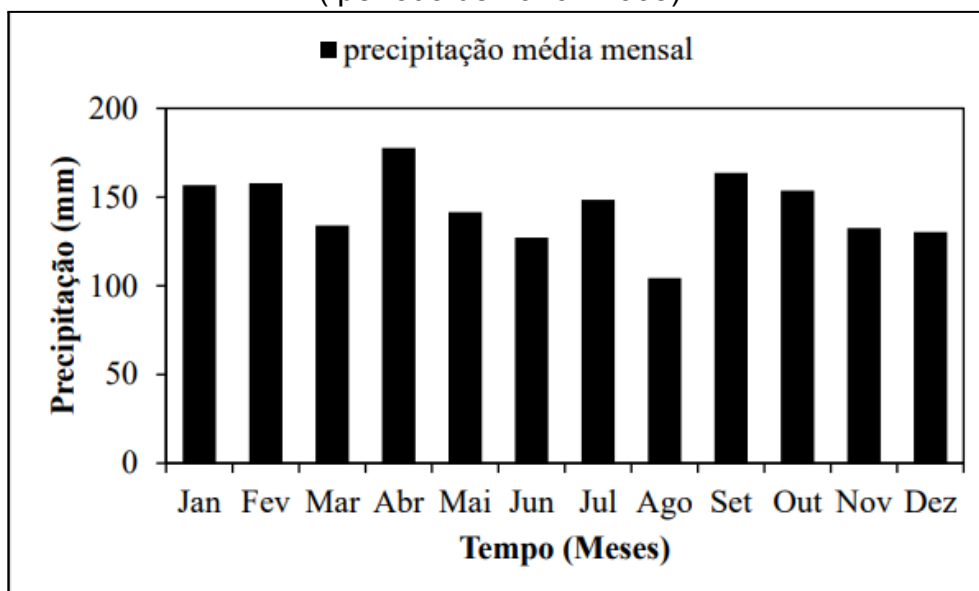
Fonte: Autora, 2023.

5.2 CLIMA E CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

O clima característico dessa região é classificado como mesotérmico brando super-úmido, com uma amplitude térmica considerável. A temperatura média anual é de 18°C, podendo atingir até 38°C no verão, enquanto no inverno, a formação de 15 a 20 geadas é comum (IBGE).

A bacia do Camaquã, assim como todo o estado do Rio Grande do Sul, caracteriza-se por boa disponibilidade hídrica e distribuição uniforme das chuvas ao longo do ano, sem uma estação seca bem definida. Há precipitações em todos os meses, e não há uma grande diferença quantitativa entre o mês mais seco e o mais chuvoso (SOTÉRIO et al., 2005). Durante o período de 1976 a 2005, Caçapava do Sul registrou uma média anual de precipitação pluviométrica de 1727,4mm, com umidade relativa variando entre 76% e 78%. A velocidade média do vento é de 3,25 a 3,5 m/s. O mês com maior índice de pluviosidade é abril, atingindo 177,6 mm, enquanto agosto é o mês com menor índice, com média de 104,3 mm (WREGE et al., 2012). Apresentado na figura 12.

Figura 12 - Médias mensais de precipitação em Caçapava do Sul,RS (período de 1976 - 2005)

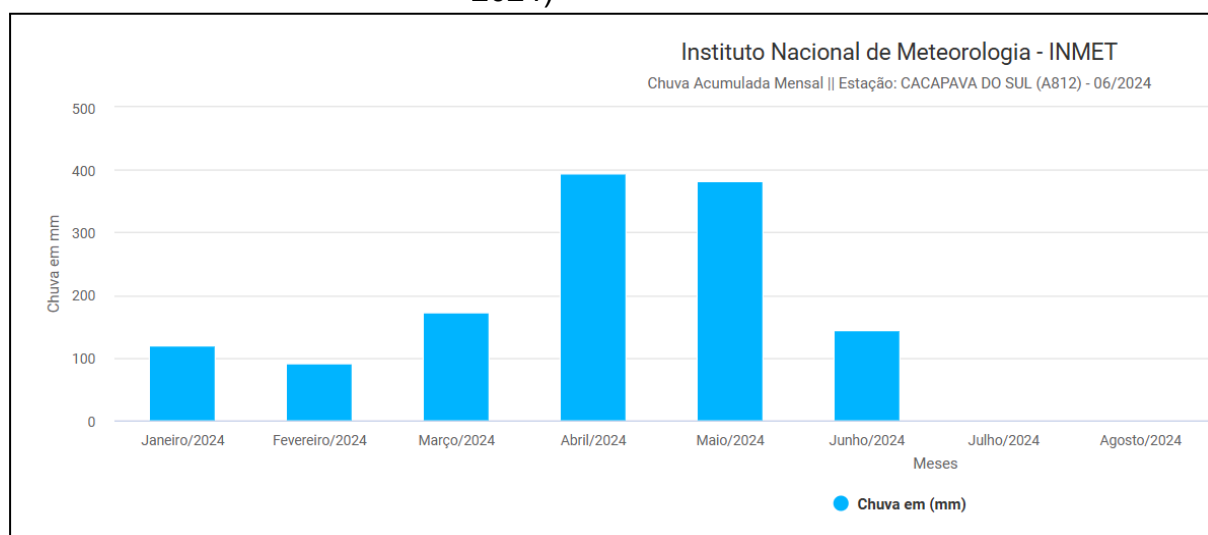


Fonte: WREGE et al., 2012.

Em 2024, o Rio Grande do Sul enfrentou um dos piores desastres climáticos de sua história devido a chuvas intensas e persistentes. Esse evento climático extremo resultou em enchentes severas, deslizamentos de terra e grandes prejuízos

materiais e humanos em várias regiões do estado. Em Caçapava do Sul, a precipitação foi especialmente intensa, com um total de 395 mm de chuva em abril e 391 mm em maio. Esses volumes são significativamente superiores à média histórica para esses meses. Conforme a figura 13.

Figura 13 - Chuva acumulada em Caçapava do Sul (período de janeiro a junho de 2024)



Fonte: INMET

A geomorfologia do município de Caçapava do Sul se insere na região geomorfológica do Planalto Sul-Rio-Grandense, contendo as unidades de relevo 'Planaltos Rebaixados Canguçu-Caçapava' e 'Planaltos Marginais Rebaixados'. Esses relevos são marcados por colinas, áreas de topo plano, interflúvios tabulares, encostas íngremes, cornijas e cristas (Justus et al., 1986).

5.3 CONTEXTO PEDOLÓGICO

De acordo com as observações de Streck (2008), a Província do Escudo Sul-Rio-Grandense exibe uma notável diversidade geológica, com uma predominância de litologias de origem pré-cambriana. Caçapava do Sul se localiza na província pedogenética das Serras do Sudeste, essa região abriga diversos tipos de solos. Os mais comuns são o Neossolo Regolítico e o Litólico, enquanto o Luvissole, Planossolo, Chernossolo e Argissolo constituem uma parcela menor da composição de solos na área.

5.4 HIDROLOGIA

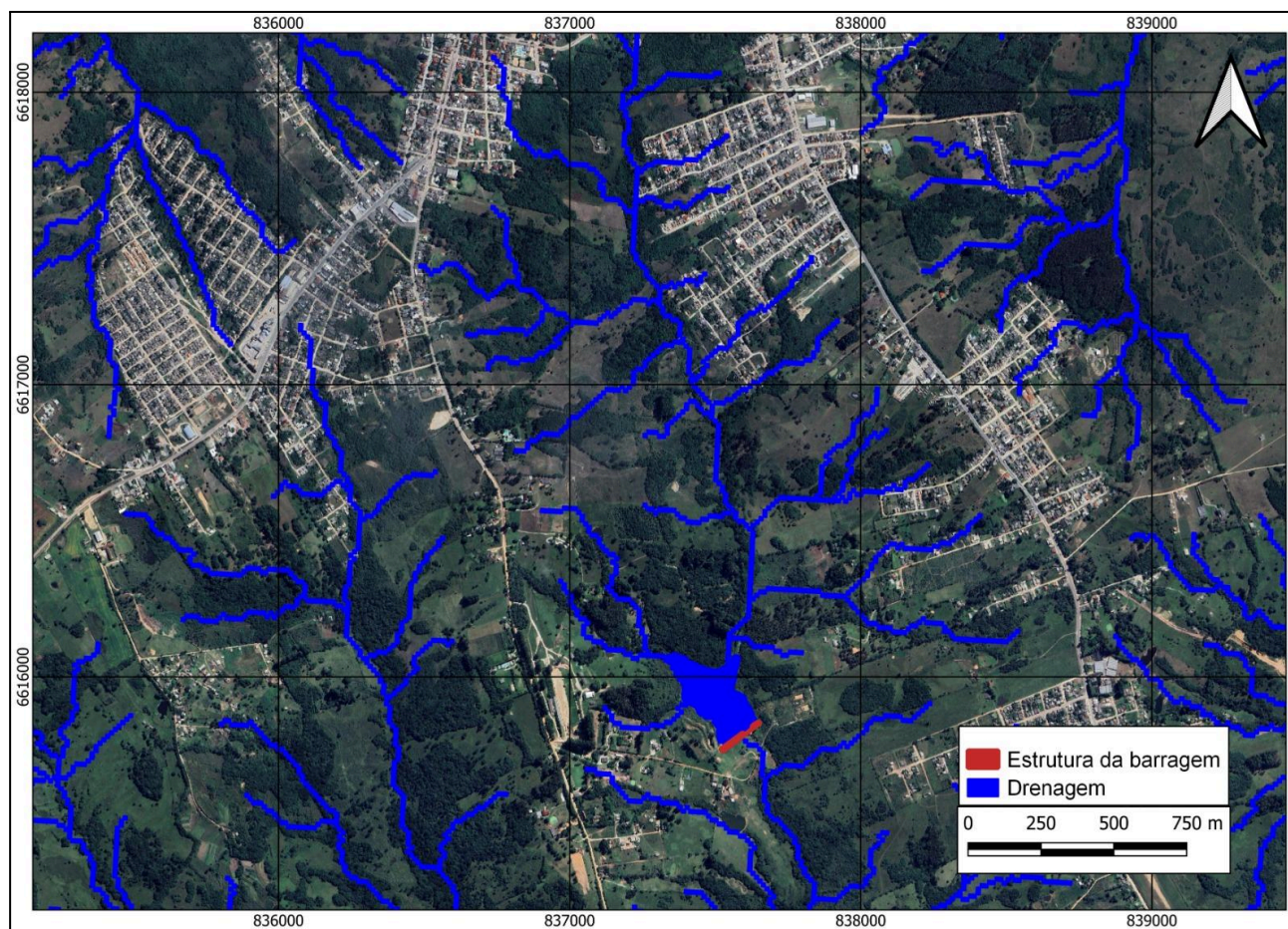
O município de Caçapava do Sul faz parte de três Unidades Hidrológicas de Planejamento: Vacacaí/Vacacaí Mirim, Camaquã e Baixo Jacuí, sendo esta última a que abriga a barragem em questão. A jusante da barragem, na direção nordeste, encontra-se o Arroio Irapuãzinho, cujo curso segue para leste e deságua no Arroio do Salso, situado ao sul do ponto de estudo (SNIRH, 2017).

Segundo Machado (2005), os principais Sistemas Aquíferos que abrangem a bacia hidrográfica do Rio Camaquã são o Embasamento Cristalino II e o Aquiclude Eopaleozoico. Na bacia hidrográfica do Baixo Jacuí, encontram-se o Embasamento Cristalino II, Aquiclude Eopaleozoico e o Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito. Já na bacia Vacacaí-Vacacaí Mirim, os Sistemas Aquíferos aflorantes são o Embasamento Cristalino II, Aquiclude Eopaleozoico, Sistema Aquífero Palermo/Rio Bonito e Aquitardo Permiano.

Em Caçapava do Sul, estão presentes unidades do embasamento, bacia do Camaquã e bacia do Paraná. O Embasamento é composto por metavulcânicas, metassedimentares e rochas cristalinas, que pertencem à Província Mantiqueira. Na bacia do Camaquã, encontram-se rochas vulcânicas, vulcano-sedimentares e sequências sedimentares que variam de idades ediacaranas até o ordoviciano inferior. Na Bacia do Paraná, são encontrados arenitos, siltitos, conglomerados e folhelhos carbonosos (CPRM, 2008).

Na figura 14 é possível analisar as redes de drenagem que a barragem se situa.

Figura 14 - Mapa da drenagem em Caçapava do Sul



Fonte: Autora, 2024.

6. METODOLOGIA

A metodologia foi estruturada com base em quatro etapas.

- a) etapa preliminar: nesta etapa foram realizadas pesquisas de bibliografias disponíveis, para revisão bibliográfica e buscar por referências já existentes da própria barragem, destacando-se que existem dois estudos, conforme Miranda (2021) e Carminatti (2023);
- b) etapa de campo: consiste na realização de visitas preliminares da área de estudo e a realização do levantamento geofísico;
- c) etapa de tratamento dos dados: inclui a organização e o tratamento dos dados coletados na bibliografia e no campo e os resultados gerados pela modelagem;
- d) etapa de análise e discussão dos dados obtidos a partir dos ensaios de solo, da investigação geofísica e da modelagem numérica.

As etapas mencionadas foram realizadas nas dependências da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA.

6.1 VISITA DE RECONHECIMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

As visitas de campo serviram para reconhecimento da área de estudo e também com o interesse de avaliar quais áreas da barragem poderiam apresentar maiores riscos de rompimento. Além disso, nessa etapa, foram analisadas a presença de vegetação e a identificação de possíveis zonas de saturação no talude a jusante.

6.2 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

Com as visitas de campo, foi possível elaborar dois perfis longitudinais na direção do eixo principal da barragem. O primeiro perfil (Perfil 1) está situado na crista e o segundo perfil na jusante da barragem (Perfil 2) , os outros dois perfis

longitudinais foram adquiridos na direção perpendicular ao eixo principal da barragem (Perfis 3,4) como indicados na figura 15.

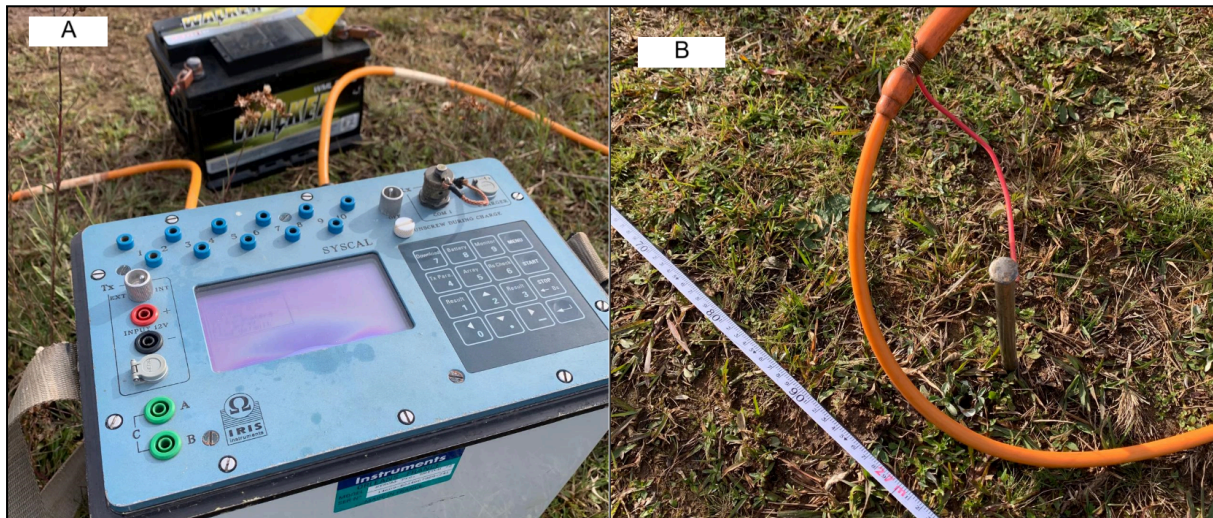
Figura 15 - Mapa dos perfis de eletrorresistividade e GPR



Fonte: Autora, 2024.

O levantamento geofísico de eletrorresistividade foi realizado, por meio de um eletrorresistímetro multicanal modelo Syscal Pro, fabricado pela Iris Instruments (França). O campo teve a duração aproximada de 2h30. Foi utilizada a técnica de caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo e um espaçamento de 3 metros entre os eletrodos. Os dados foram processados através do *software* Res2Dinv, desenvolvido pela Geotomo *Software*. Na figura 16 estão alguns registros do campo.

Figura 16 - (A) Equipamento Syscal (B) Conexão dos eletrodos



Fonte: Autora, 2024.

No método Georadar, foi utilizado o equipamento GPR fabricado pela IDS Ingegneria Dei Sistemi (Itália), com a antena de 80 Mhz de frequência. Este campo teve a duração aproximada de 1h e na figura 17 mostram registros. E foram utilizados os mesmos perfis do método anterior e posteriormente os dados foram processados através do *software* ReflexW, desenvolvido pela empresa alemã Sandmeier Geophysical Research.

Realizando os mesmos perfis nos dois métodos, posteriormente foi possível analisar e correlacionar os resultados. Assim obtendo resultados mais concretos e confiáveis.

Figura 17 - (A) Equipamento IDS Instruments, (B) Funcionamento do Georadar



Fonte: Autora, 2024.

6.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA DOS SOLOS

O presente trabalho usará de base o Trabalho de Conclusão de Curso da Gabriela Miranda, onde realizou a caracterização física e mecânica do solo da Barragem da Corsan, no ano de 2021. Através dos ensaios de laboratório, com a coleta de amostras de de campo, realizou a análise granulométrica, limites de atterberg, peso específico dos grãos e cisalhamento direto.

6.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE

Nesta etapa, foi utilizado o *software* HYRCAN, um programa gratuito para análise de estabilidade de taludes. O HYRCAN permite avaliar o fator de segurança de superfícies de falha circulares em solo ou taludes rochosos. Os dados obtidos dos levantamentos geofísicos permitiram a caracterização do perfil geológico do talude com o objetivo de mensurar o fator de segurança.

Por meio do *software* HYRCAN, foram determinados os fatores de segurança (FS) do talude analisado, assumindo uma superfície de ruptura do tipo circular e utilizando o método de equilíbrio de Bishop.

Para a análise dos fatores de segurança (FS), foi utilizada a norma ABNT NBR 11682 (2009).

A modelagem foi conduzida com base nos dados obtidos a partir dos ensaios realizados em condições naturais do terreno, ou seja, amostras não saturadas. As propriedades do material de fundação da barragem foram determinadas com base nas características pedológicas da região da área de estudo. Os parâmetros geotécnicos do solo utilizados foram:

- ❖ Peso específico natural (kN/cm^3)
- ❖ Coesão (kPa)
- ❖ Ângulo de atrito

A geometria utilizada no *software* HYRCAN foi adaptada de Miranda (2021), assim como os parâmetros usados como base. As análises geofísicas realizadas em 2024 permitiram ajustar os dados atuais, resultando em duas possíveis condições conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros adotados para análise de estabilidade do talude na barragem.

Parâmetros adotados para o corpo da barragem			
	Peso específico (kN/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito ($^\circ$)
Condição base (2021)	15	2	38
Condição 1 (2024)	16	1	35
Condição 2 (2024)	17	1	33

Fonte: Autora, 2024.

Com as informações das investigações geofísicas que indicam que o solo se encontra saturado, utilizamos a bibliografia para ajustar os parâmetros geotécnicos e justificamos as duas condições utilizadas no presente estudo.

A coesão de solos arenosos saturados é tipicamente muito baixa, muitas vezes assumida como zero, especialmente em solos limpos sem materiais finos. Segundo Holtz e Kovacs (1981), solos arenosos saturados apresentam essa característica devido à ausência de partículas finas que poderiam proporcionar uma coesão significativa. Em relação ao ângulo de atrito, Terzaghi, Peck e Mesri (1996) explicam que, para solos arenosos saturados, ele pode variar entre 30° e 35° , dependendo da forma e da distribuição dos grãos de areia. Esta variação se dá devido à resistência ao cisalhamento que, apesar de diminuída pela presença de água, ainda é significativa.

Para solos argilosos saturados, o peso específico pode variar entre 16 kN/m^3 e 20 kN/m^3 , conforme detalhado por Holtz e Kovacs (1981). Esta variação é influenciada pelo conteúdo de água e pela densidade do solo, fatores que aumentam o peso específico quando o solo se encontra completamente saturado.

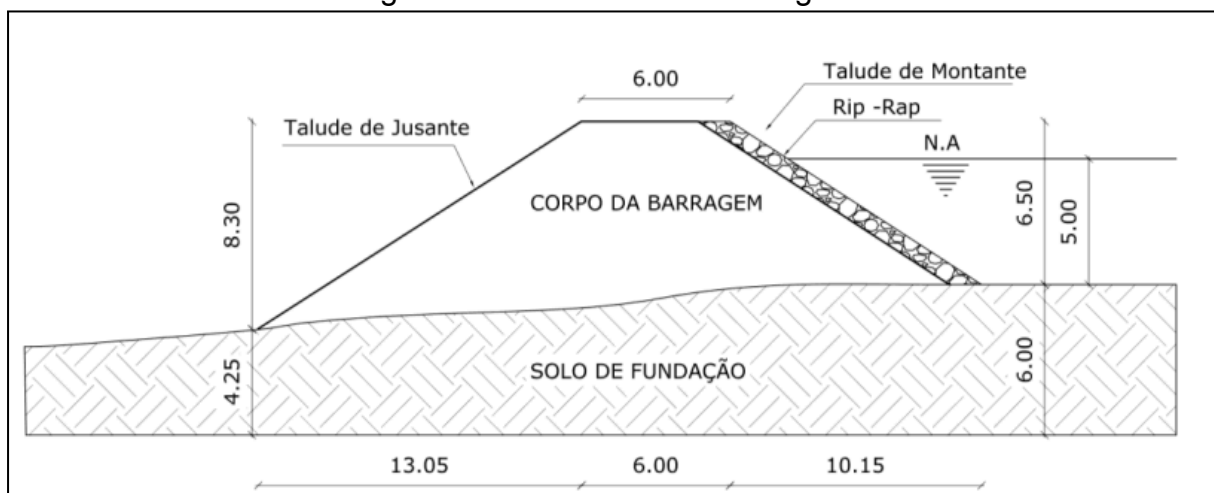
Os parâmetros adotados para a fundação estão apresentados na Tabela 4 e a geometria utilizada no *software* está apresentada na figura 18.

Tabela 4 - Parâmetros para a fundação

Parâmetros adotados para a fundação		
Peso específico (kN/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito ($^\circ$)
20	8	35

Fonte: Autora, 2024.

Figura 18 - Geometria da barragem



Fonte: Miranda (2021).

Neste trabalho, foram calculados os fatores de segurança pelos métodos de Bishop Simplificado (1955) e Janbu Simplificado (1958). Esses métodos são amplamente utilizados na engenharia geotécnica para avaliação da estabilidade de taludes. O método de Bishop Simplificado, proposto por R. F. Bishop em 1955, simplifica a análise de estabilidade de taludes usando um círculo de ruptura e equações que levam em conta a coesão e o ângulo de atrito do solo. Já o método de Janbu Simplificado, proposto por E. N. Janbu em 1958, também usa um círculo de ruptura, porém considera a influência da inclinação do talude e a redução na coesão efetiva devido ao atrito do solo.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados e analisados individualmente ao longo deste capítulo. Iniciando com as investigações geofísicas, primeiramente a eletrorresistividade e posteriormente o GPR, na sequência por meio do *software* Hyrcan serão determinados os fatores de segurança (FS) do talude analisado e grau de estabilidade da barragem.

7.1 ANÁLISE ELETORRESISTIVIDADE

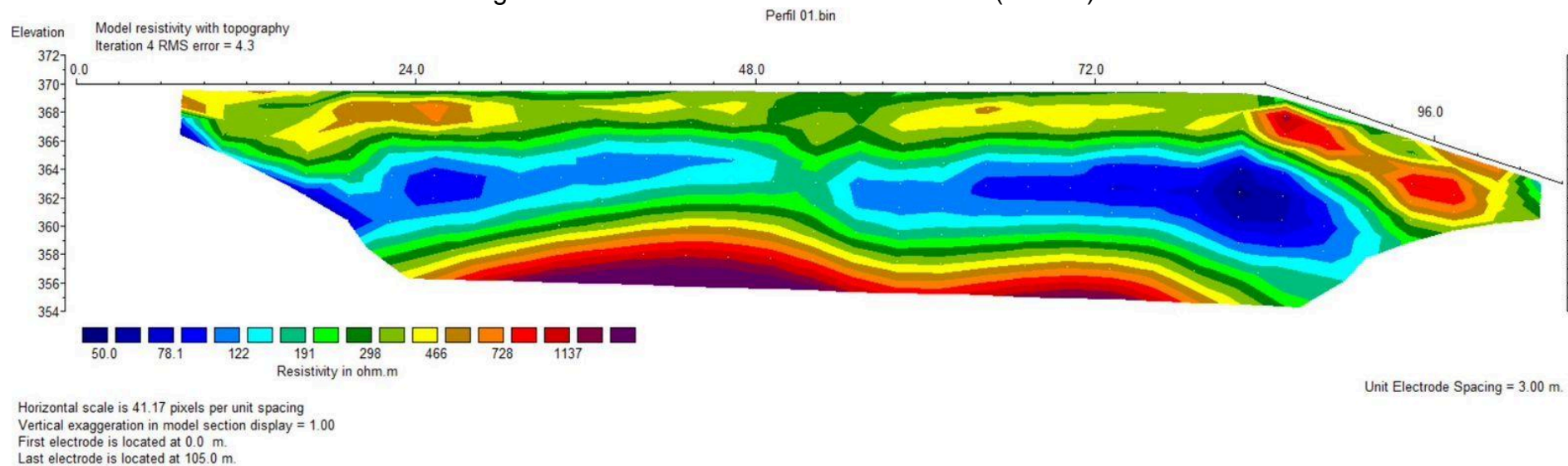
A análise do perfil de eletrorresistividade apresentado revela uma série de camadas com diferentes resistividades ao longo de uma seção transversal que se estende de 0 a 105 metros, com espaçamento unitário de eletrodos de 3 metros. A cota da seção vai de aproximadamente 354 a 370 metros. Num total de 16 metros de profundidade.

Na parte superior do perfil, observamos uma camada com resistividade relativamente alta, variando de 191 a 466 ohm.m, indicada pelas cores verde e amarelo. Esta camada se estende superficialmente ao longo de todo o perfil, sugerindo a presença de um material mais resistivo próximo à superfície, possivelmente solo seco.

Abaixo desta camada superficial, vemos uma região de menor resistividade, variando entre 50 e 122 ohm.m (azul escuro a azul claro), especialmente evidente entre os 24 e 72 metros horizontais, e profundidades de aproximadamente 360 a 366 metros. Esta área de baixa resistividade pode indicar a presença de materiais mais condutivos, como solo saturado ou argilas.

Entre as profundidades de 354 a 360 metros, especialmente sob a região entre 48 e 72 metros horizontais, observa-se uma zona de alta resistividade, com valores entre 466 e 1137 ohm.m (laranja a vermelho). Este padrão pode indicar a presença do substrato rochoso da área. Na Figura 19 é apresentado o perfil 1 do levantamento geofísico realizado na crista da barragem.

Figura 19 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 1)



Fonte: Autora, 2024.

No segundo perfil de eletrorresistividade, observa-se uma variação significativa de resistividades ao longo da seção transversal que se estende de 0 a 105 metros, com espaçamento unitário de eletrodos de 3 metros. A profundidade da seção vai de aproximadamente 352 a 370 metros. Num total de 18 metros.

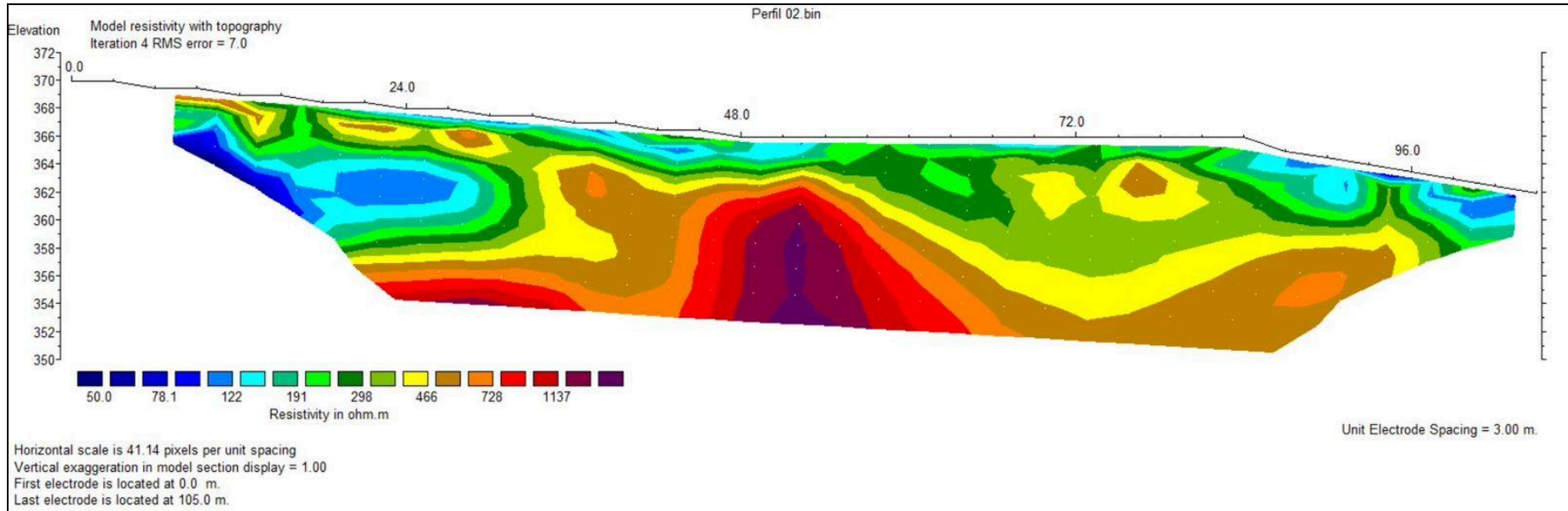
Na parte superior do perfil, entre 0 e 24 metros horizontais, ocorre uma camada com resistividades variando de 191 a 466 ohm.m, representadas pelas cores verde e amarelo. Essa camada superficial é seguida por uma zona de baixa resistividade, com valores entre 50 e 122 ohm.m (azul escuro a azul claro), que se estende até aproximadamente 362 metros de profundidade. Isso sugere a presença de materiais mais condutivos, possivelmente solo saturado ou argilas.

A partir dos 24 metros horizontais até aproximadamente os 72 metros, a resistividade aumenta gradualmente para valores entre 466 e 1137 ohm.m (laranja a vermelho), especialmente evidente a profundidades entre 354 e 362 metros. Este padrão pode indicar a presença de um substrato rochoso mais resistivo ou rochas consolidadas.

Entre os 48 e 96 metros horizontais, há uma alternância de zonas de alta e baixa resistividade. Notamos que entre os 60 e 90 metros horizontais, a resistividade diminui para valores entre 50 e 122 ohm.m (azul escuro a azul claro), sugerindo novamente a presença de materiais mais condutivos. Esta alternância pode indicar mudanças na litologia ou variações na saturação de água.

Mais profundamente, a partir dos 60 metros horizontais até os 105 metros, observamos uma zona de alta resistividade, com valores entre 466 e 1137 ohm.m (laranja a vermelho), que se estende até profundidades maiores que 362 metros. Esse padrão indica a presença de um material mais resistivo, possivelmente rocha consolidada. Na Figura 20 é apresentado o perfil 2 localizado a jusante.

Figura 20 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 2)



Fonte: Autora, 2024.

O terceiro perfil de eletrorresistividade mostra uma seção transversal que se estende de 0 a 34 metros, com espaçamento unitário de eletrodos de 2 metros. A profundidade da seção vai de aproximadamente 358 a 370 metros.

Na parte superior do perfil, observamos uma camada de resistividade relativamente alta, variando de 191 a 466 ohm.m, representada pelas cores verde e amarelo. Esta camada se estende superficialmente ao longo do perfil, especialmente entre 0 e 24 metros horizontais, e profundidades de aproximadamente 366 a 368 metros. Este padrão sugere a presença de um material mais resistivo próximo à superfície, possivelmente solo seco.

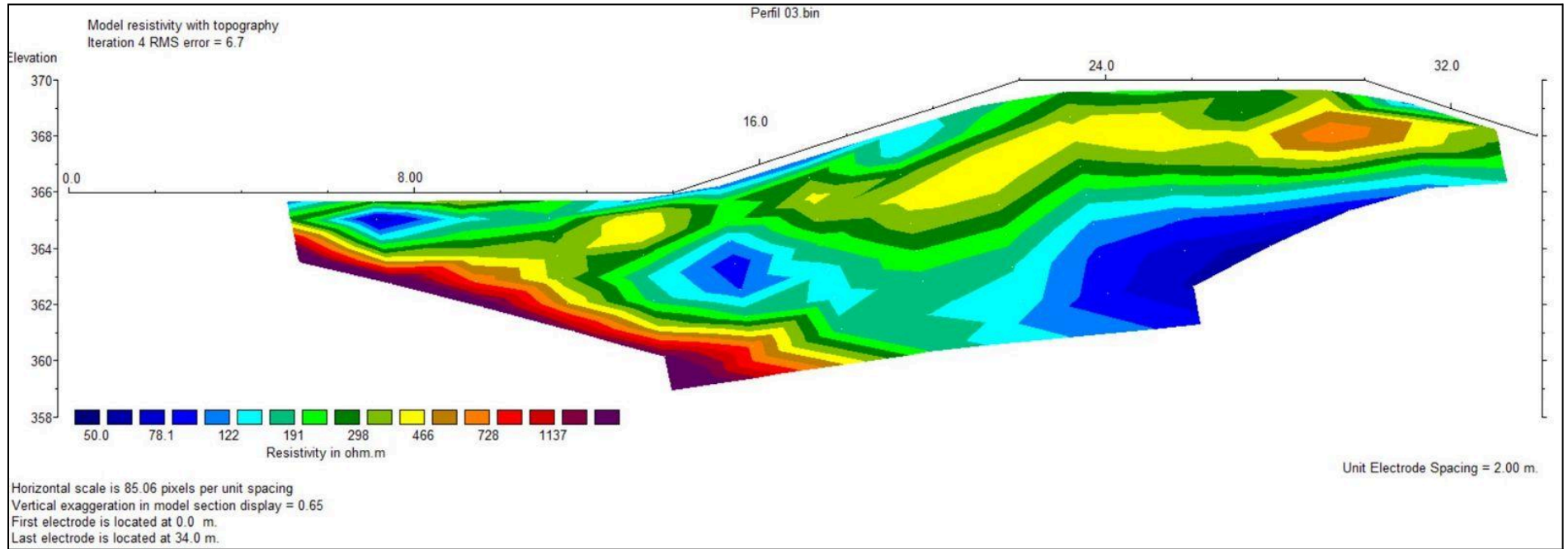
Abaixo desta camada superficial, há uma região de menor resistividade, variando entre 50 e 122 ohm.m (azul escuro a azul claro), especialmente evidente entre os 8 e 24 metros horizontais, e profundidades de aproximadamente 358 a 364 metros. Esta área de baixa resistividade pode indicar a presença de materiais mais condutivos, como solo saturado ou argilas.

Entre 0 e 8 metros horizontais, e profundidades de 362 a 366 metros, há uma zona de alta resistividade, com valores variando entre 466 e 1137 ohm.m (laranja a vermelho). Este padrão pode indicar a presença de um substrato rochoso mais resistivo ou rochas consolidadas.

Entre os 8 e 32 metros horizontais, observamos uma alternância de zonas de alta e baixa resistividade. Notamos que entre os 16 e 24 metros horizontais, a resistividade diminui para valores entre 50 e 122 ohm.m (azul escuro a azul claro), sugerindo novamente a presença de materiais mais condutivos. Esta alternância pode indicar mudanças na litologia ou variações na saturação de água.

A partir dos 24 metros horizontais até o final do perfil (34 metros), há uma predominância, com valores entre 191 e 466 ohm.m (verde a amarelo), sugerindo a presença de material não saturado, logo mais resistivo. Na Figura 21 é apresentado o perfil 3 longitudinal da barragem.

Figura 21 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 3)



Fonte: Autora, 2024.

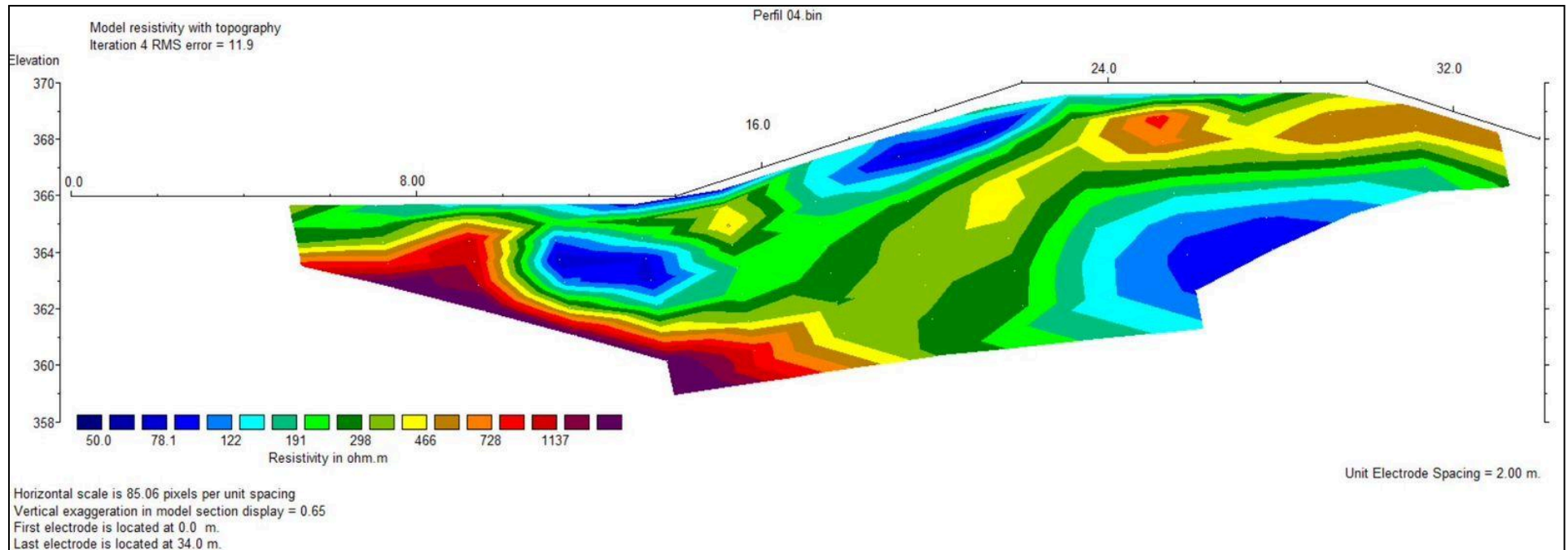
O quarto perfil cobre uma extensão horizontal de 32 metros, com espaçamento entre eletrodos de 2 metros. A profundidade varia de 358 metros a 370 metros. A escala horizontal é de 85.06 pixels por unidade de espaçamento, assegurando a precisão na representação gráfica.

Na porção superficial do perfil, observa-se uma variação de resistividade entre 191 ohm.m e 466 ohm.m, com áreas de menor resistividade (entre 50 e 122 ohm.m) concentradas próximas à superfície nos primeiros 8 metros horizontais e entre 362 e 364 metros de profundidade. Essas áreas de baixa resistividade podem indicar a presença de materiais saturados ou argilosos.

À medida que se aprofunda, a resistividade tende a aumentar, com valores que excedem 1137 ohm.m em algumas regiões, especialmente a partir dos 16 metros horizontais e nas profundidades que variam de 360 a 366 metros. Esta alta resistividade sugere a presença de materiais geológicos mais consolidados e menos saturados, como rochas ou solos secos e compactos.

. As áreas de transição, onde a resistividade muda abruptamente, o que também podem indicar zonas de fraqueza, pois essas transições podem estar associadas a interfaces entre diferentes tipos de materiais geológicos, como solos e rochas fraturadas, que têm comportamentos geotécnicos distintos, como contatos entre camadas de solo e rocha ou zonas de fraturas e fissuras. Na Figura 22 é apresentado o perfil 4 longitudinal da barragem.

Figura 22 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 4)



Fonte: Autora, 2024.

7.2 ANÁLISE GEORADAR

A análise do perfil de georadar da Linha 1 revela diversas características geofísicas significativas em termos de profundidade e comprimento de onda. O eixo horizontal do perfil representa a distância em metros, enquanto o eixo vertical indica o tempo de viagem em nanossegundos (ns), que é diretamente relacionado à profundidade da subsuperfície.

Para converter tempo em nanossegundos para distância em metros usando a velocidade da luz, multiplicamos o tempo em nanossegundos (t ns) pela velocidade da luz ($c \approx 299,792,458$ m/s) e dividimos por 10^9 (para converter ns para segundos). (Nasa, 2022). Então neste primeiro perfil encontramos aproximadamente 44.97 metros.

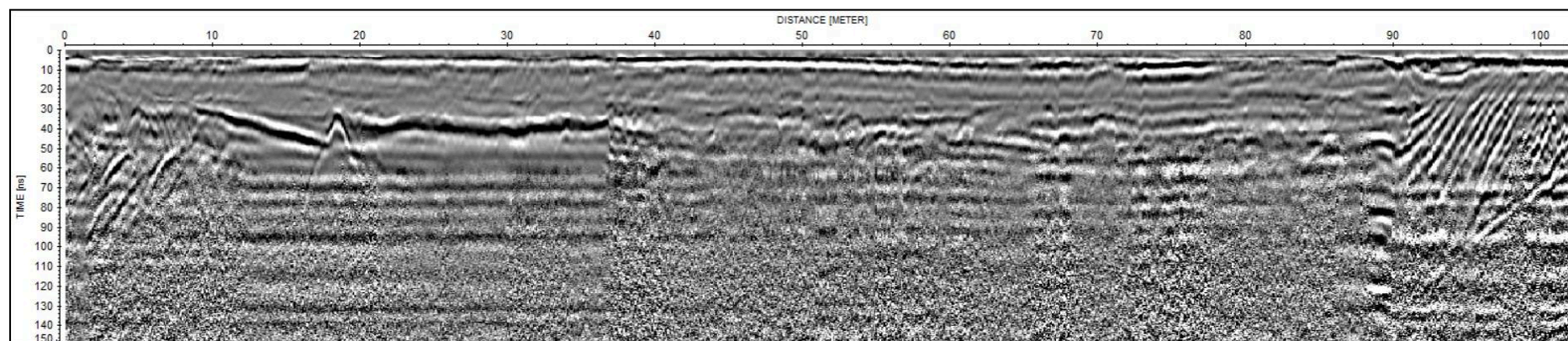
Observa-se que as camadas superficiais até aproximadamente 30 ns de profundidade apresentam uma alta refletividade, indicando a presença de materiais de alta densidade ou com mudanças de propriedades dielétricas significativas. Estas reflexões fortes são comuns em solos compactos, rochas rijas ou interfaces entre diferentes materiais geológicos. Entre 10 e 50 metros de distância, a profundidade é marcada por reflexões contínuas e horizontais, sugerindo uma estratificação regular do solo. Essas características podem indicar a presença de camadas bem definidas, com baixa alteração estrutural.

Por outro lado, nas profundidades entre 50 e 100 ns, especialmente entre 40 e 90 metros de distância, nota-se uma maior complexidade nas reflexões, com padrões ondulados e áreas de fraca refletividade. Essas variações podem ser interpretadas como materiais mais heterogêneos que causam dispersão e atenuação das ondas de radar. A presença dessas zonas sugere a existência de condições geológicas menos estáveis, que podem incluir solos soltos, áreas de saturação com água ou materiais porosos.

No intervalo entre 60 e 100 metros de distância, as reflexões começam a mostrar padrões inclinados e distorcidos, indicando possíveis áreas críticas do ponto de vista geotécnico, pois podem representar zonas de fraqueza que impactam a estabilidade estrutural do terreno.

Além disso, a resolução vertical do perfil, que depende da frequência das ondas de radar utilizadas, permite identificar detalhes finos das camadas do solo. As ondas de radar de alta frequência, com comprimentos de onda menores, são capazes de distinguir camadas finas e interfaces nítidas, enquanto ondas de baixa frequência, com comprimentos de onda maiores, penetram mais profundamente, mas com menor resolução. Na Figura 23, é apresentado a linha 1(Perfil 1), do levantamento realizado com georadar na crista da barragem.

Figura 23 - Perfil de georadar (Linha 1)



Fonte: Autora, 2024.

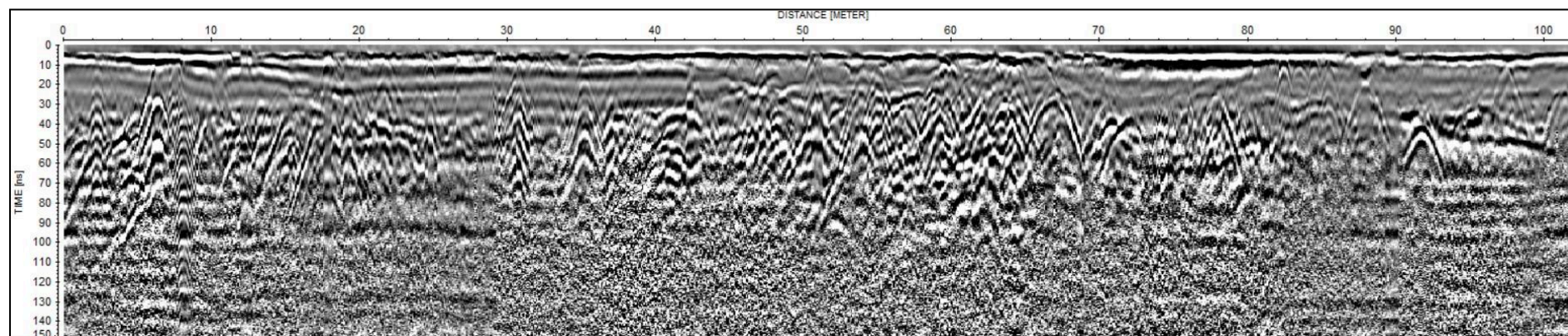
A análise do perfil de georadar da Linha 2 revela características geofísicas distintas. Nas primeiras camadas, até aproximadamente 30 ns de profundidade, observam-se reflexões contínuas e horizontais, especialmente entre 0 e 10 metros e 80 a 100 metros de distância. Isso indica uma estratificação uniforme do solo, sugerindo a presença de materiais homogêneos ou rochas compactas com propriedades dielétricas constantes.

Entre 10 e 80 metros de distância, a profundidade é marcada por reflexões complexas e padrões ondulados que se estendem até cerca de 70 ns. Essas variações podem indicar zonas de fraturas ou heterogeneidade no solo, como a presença de materiais de diferentes densidades ou composição. As reflexões inclinadas e distorcidas sugerem estruturas geológicas, indicando possíveis zonas de fraqueza geológica que poderiam impactar a estabilidade estrutural do terreno.

Profundidades maiores que 70 ns, especialmente entre 20 e 90 metros de distância, apresentam uma atenuação significativa das ondas de radar, resultando em uma menor resolução das reflexões. Isso pode ser causado pela presença de materiais porosos ou saturados com água, que absorvem e dispersam as ondas de radar, dificultando a penetração e a resolução do sinal.

Em termos gerais, o perfil da Linha 2 revela uma estrutura subsuperficial complexa, com áreas de estratificação estável e zonas de fraqueza geológica significativas. A presença de reflexões inclinadas, padrões ondulados e atenuação do sinal em profundidades maiores sugere a existência de fraturas, falhas e materiais heterogêneos que podem necessitar de uma investigação mais aprofundada para garantir a segurança e a estabilidade em projetos de engenharia e construção. Na Figura 24, é apresentado a linha 2 (Perfil 2), do levantamento realizado com georadar a jusante da barragem..

Figura 24 - Perfil de georadar (Linha 2)



Fonte: Autora, 2024.

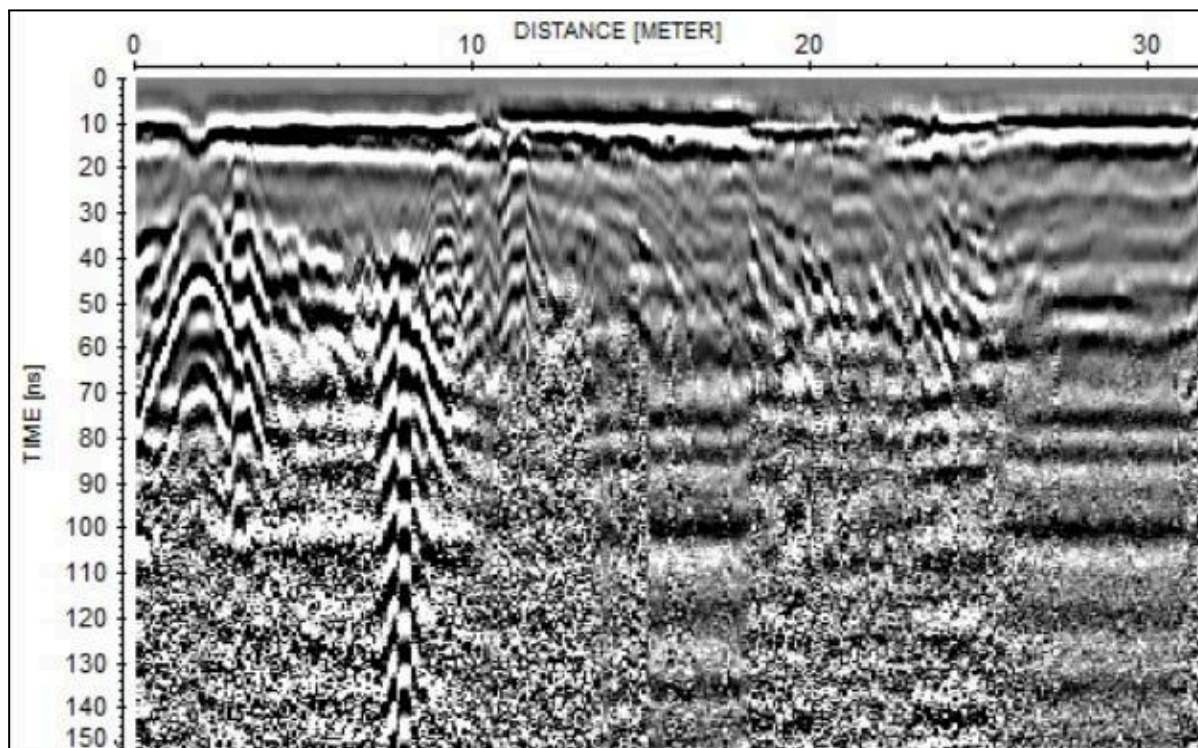
A análise do perfil de georadar da Linha 3 revela que nas primeiras camadas, até aproximadamente 30 ns de profundidade, observam-se reflexões contínuas e horizontais, especialmente entre 0 e 10 metros de distância. Isso sugere uma estratificação uniforme do solo, indicando a presença de materiais sedimentares homogêneos ou rochas compactas com propriedades dielétricas constantes.

Entre 10 e 30 metros de distância, a profundidade é marcada por reflexões complexas e padrões ondulados que se estendem até cerca de 70 ns. Essas variações podem indicar zonas de fraturas ou heterogeneidade no solo, como a presença de materiais de diferentes densidades ou composição. As reflexões inclinadas e distorcidas sugerem possíveis zonas de fraqueza geológica que poderiam impactar a estabilidade estrutural do terreno.

Profundidades maiores que 70 ns apresentam uma atenuação significativa das ondas de radar, resultando em uma menor resolução das reflexões. Isso pode ser causado pela presença de materiais porosos ou saturados com água, que absorvem e dispersam as ondas de radar, dificultando a penetração e a resolução do sinal.

A resolução vertical do perfil, determinada pela frequência das ondas de radar, permite a identificação de detalhes finos das camadas do solo. Ondas de radar de alta frequência, com comprimentos de onda menores, são capazes de distinguir camadas finas e interfaces nítidas, enquanto ondas de baixa frequência, com comprimentos de onda maiores, penetram mais profundamente mas com menor resolução. Na Figura 25, é apresentado a linha 3 (Perfil 3), do levantamento realizado com georadar longitudinal a barragem.

Figura 25 - Perfil de georadar (Linha 3)



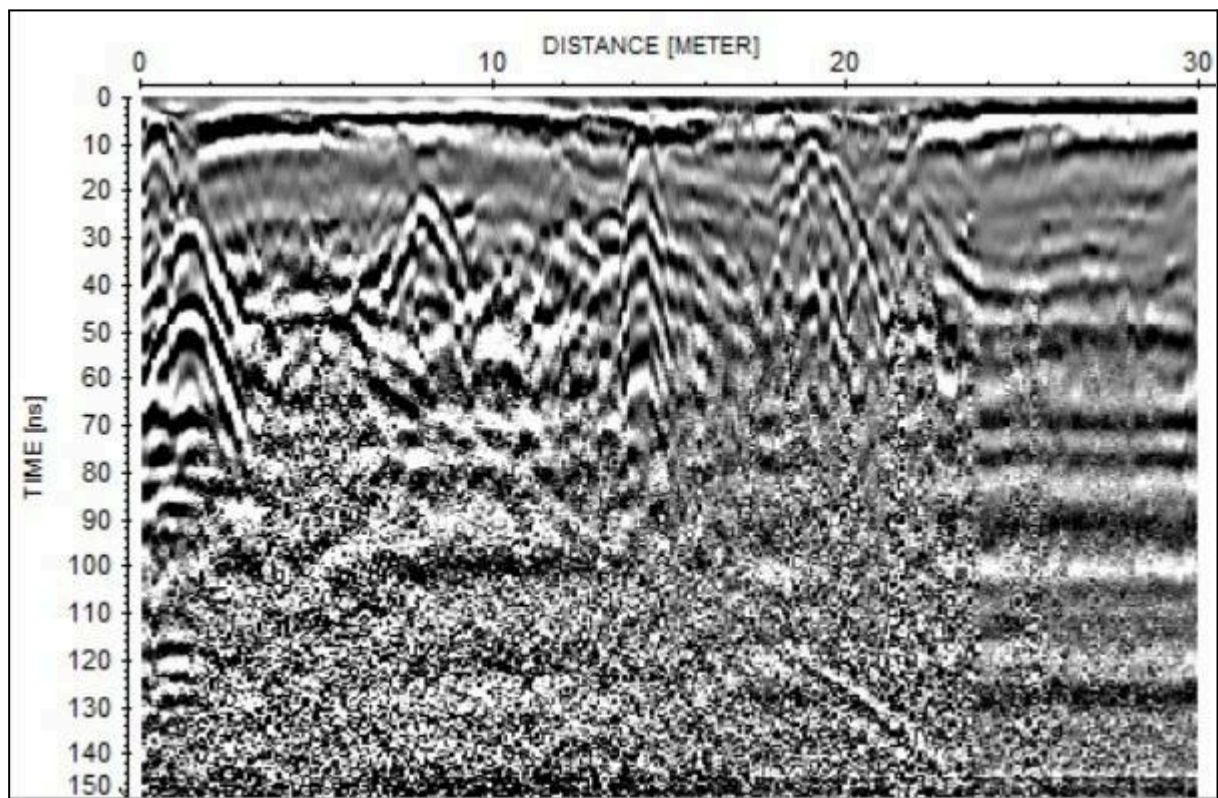
Fonte: Autora, 2024.

A análise do perfil de georadar da Linha 4 nas primeiras camadas, até aproximadamente 30 ns de profundidade, observamos reflexões contínuas e horizontais, especialmente entre 0 e 10 metros de distância. Essas reflexões sugerem uma estratificação uniforme do solo, indicando a presença de materiais homogêneos, possivelmente sedimentos finos ou rochas compactas com propriedades dielétricas consistentes.

Entre 10 e 20 metros de distância, a profundidade é marcada por reflexões mais complexas e padrões ondulados que se estendem até cerca de 60 ns. Essas variações indicam possíveis zonas de fraturas ou heterogeneidade no solo, como a presença de materiais de diferentes densidades ou composição. Reflexões inclinadas e distorcidas podem indicar zonas de fraqueza que poderiam afetar a estabilidade do terreno.

Em profundidades maiores que 60 ns, a atenuação significativa das ondas de radar reduz a resolução das reflexões. Isso pode ser devido à presença de materiais porosos ou saturados com água, que absorvem e dispersam as ondas de radar, dificultando a penetração e a resolução do sinal. Essas áreas de atenuação indicam que a composição do solo pode variar, possivelmente contendo camadas de sedimentos mais soltos ou áreas com maior grau de saturação. No perfil da Linha 4, a presença de reflexões detalhadas nas camadas superiores sugere o uso de ondas de radar de alta frequência. Na Figura 26 é apresentado a linha 4 (Perfil 4), do levantamento realizado com georadar longitudinal a barragem.

Figura 26 - Perfil de georadar (Linha 4)



Fonte: Autora, 2024.

7.3 FATOR DE SEGURANÇA

A modelagem realizada por Miranda (2021) os resultados a partir dos parâmetros de resistência obtidos do ensaio de cisalhamento ($c' = 2$ kPa e $\phi' = 38^\circ$), e peso específico de 15 kN/m^3 foram usados como referência. Com base nas análises geofísicas atualizadas para 2024, optamos por ajustar os parâmetros para $c' = 1$ kPa, $\phi' = 30^\circ$ e peso específico de 13 kN/m^3 .

Em função das dificuldades de se obter os dados técnicos da construção da barragem, não foi possível definir com precisão o nível de água no reservatório. Com isso, o mesmo foi estimado a partir da régua disposta no local, obtendo-se o valor de metros. Adicionalmente, como consequência das fortes chuvas, o nível da barragem se encontrava aproximadamente em 7 metros.

Os resultados obtidos na análise estão apresentados nas Figuras 27, 28, 29 e 30 a seguir. No primeiro cenário, a Figura 27 apresenta a análise obtida pelo método de Bishop Simplificado, onde verifica-se que o fator de segurança (FS) é de 1.304. A Figura 28 apresenta a análise obtida pelo método de Janbu Simplificado, com um fator de segurança (FS) de 1.268.

No segundo cenário, a Figura 29 apresenta a análise obtida pelo método de Bishop Simplificado, mostrando um fator de segurança (FS) de 1.211. A Figura 30 apresenta a análise obtida pelo método de Janbu Simplificado, com um fator de segurança (FS) de 1.240.

Figura 27 - Fator de segurança Bishop da condição 1

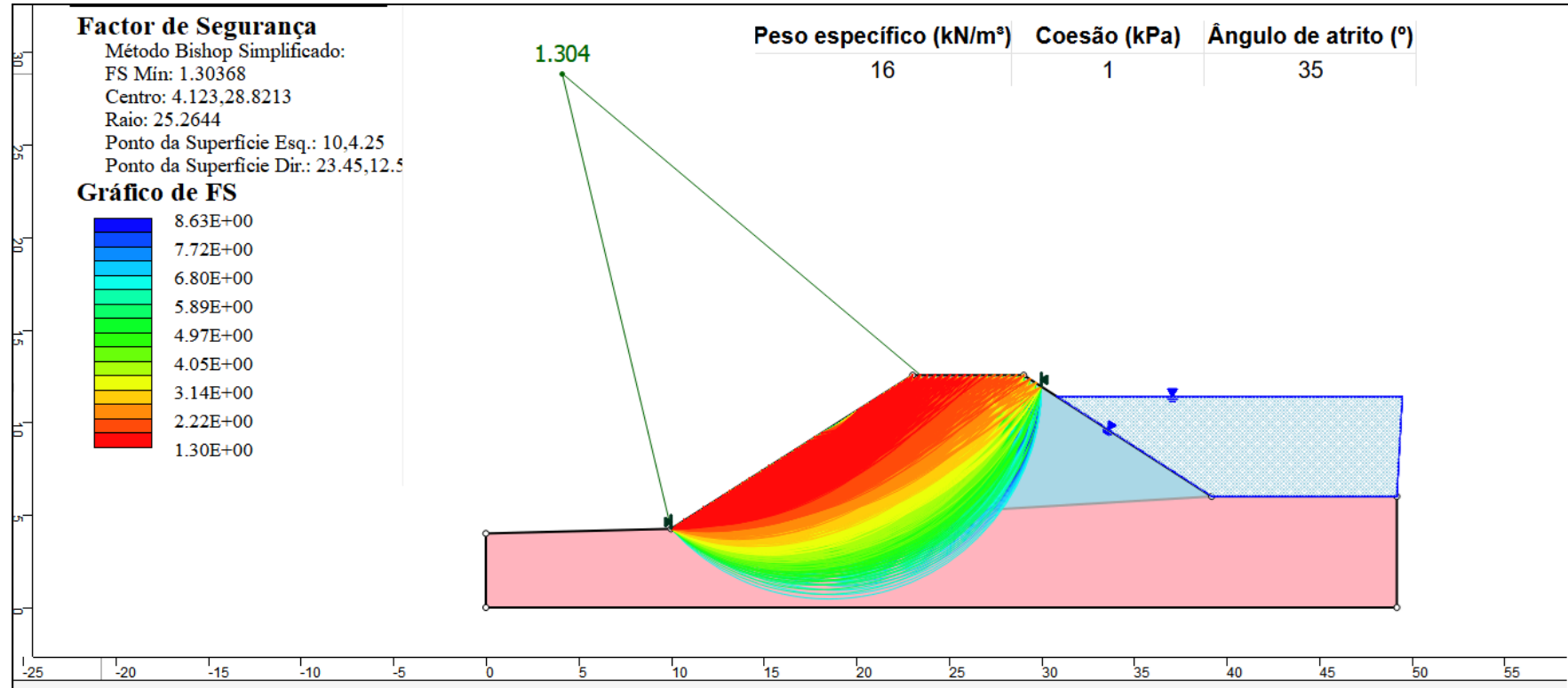
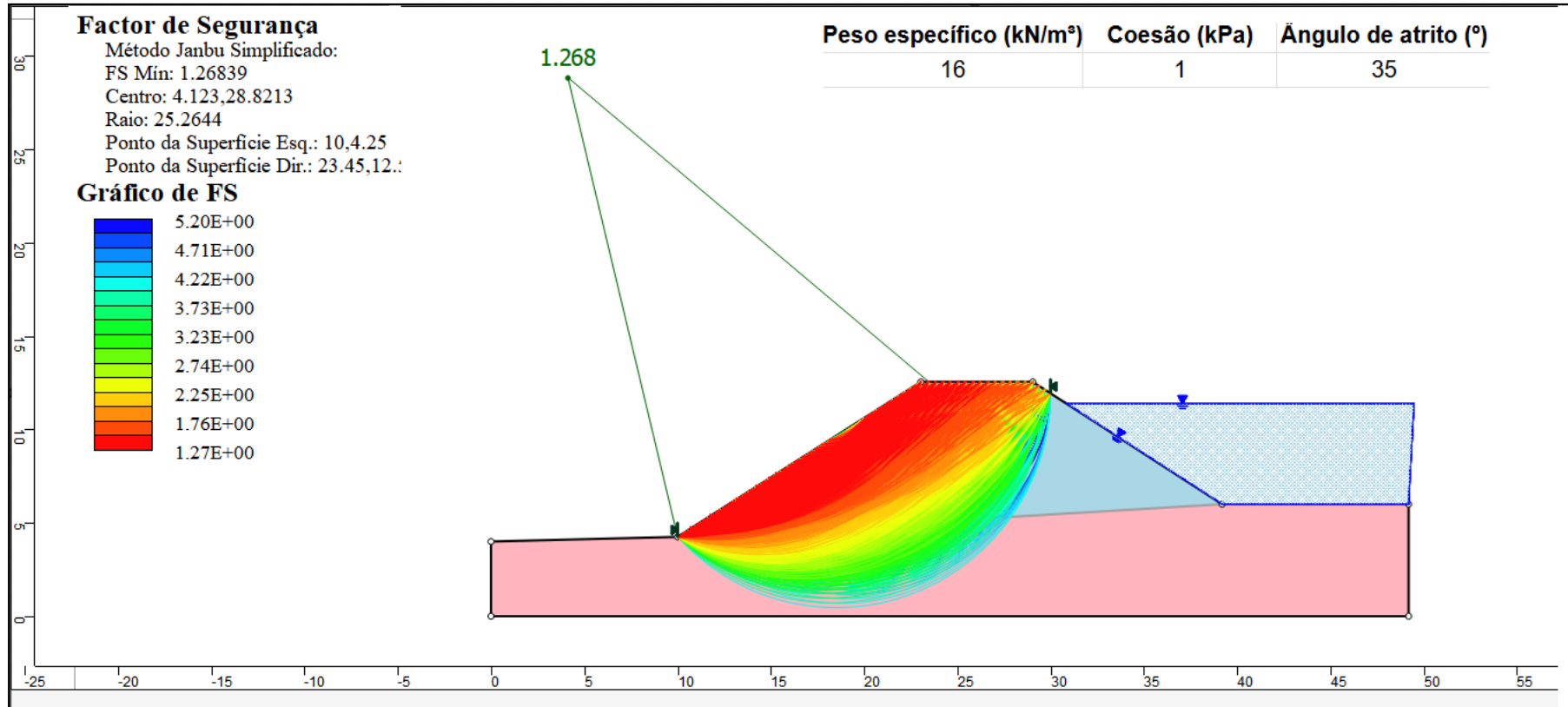
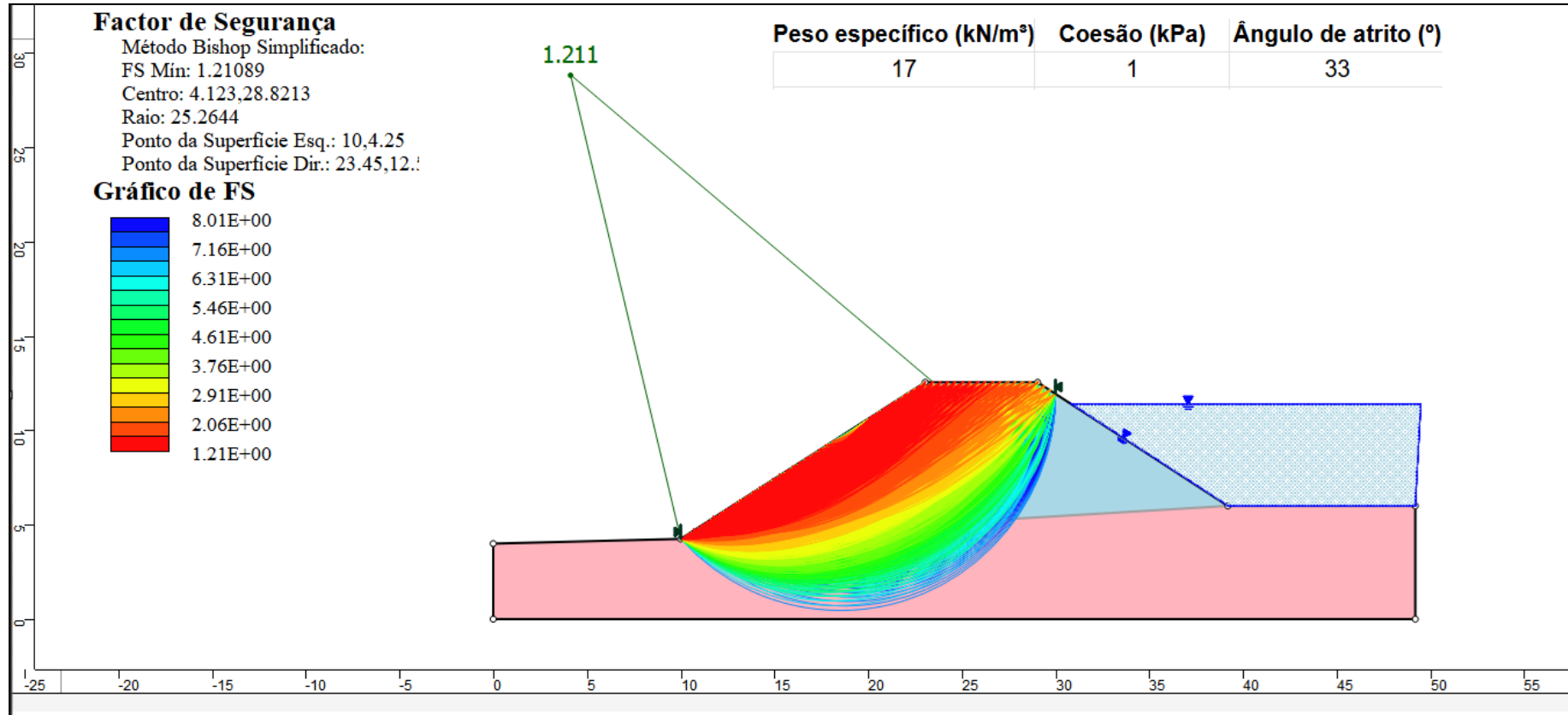


Figura 28 - Fator de segurança Janbu da condição 1



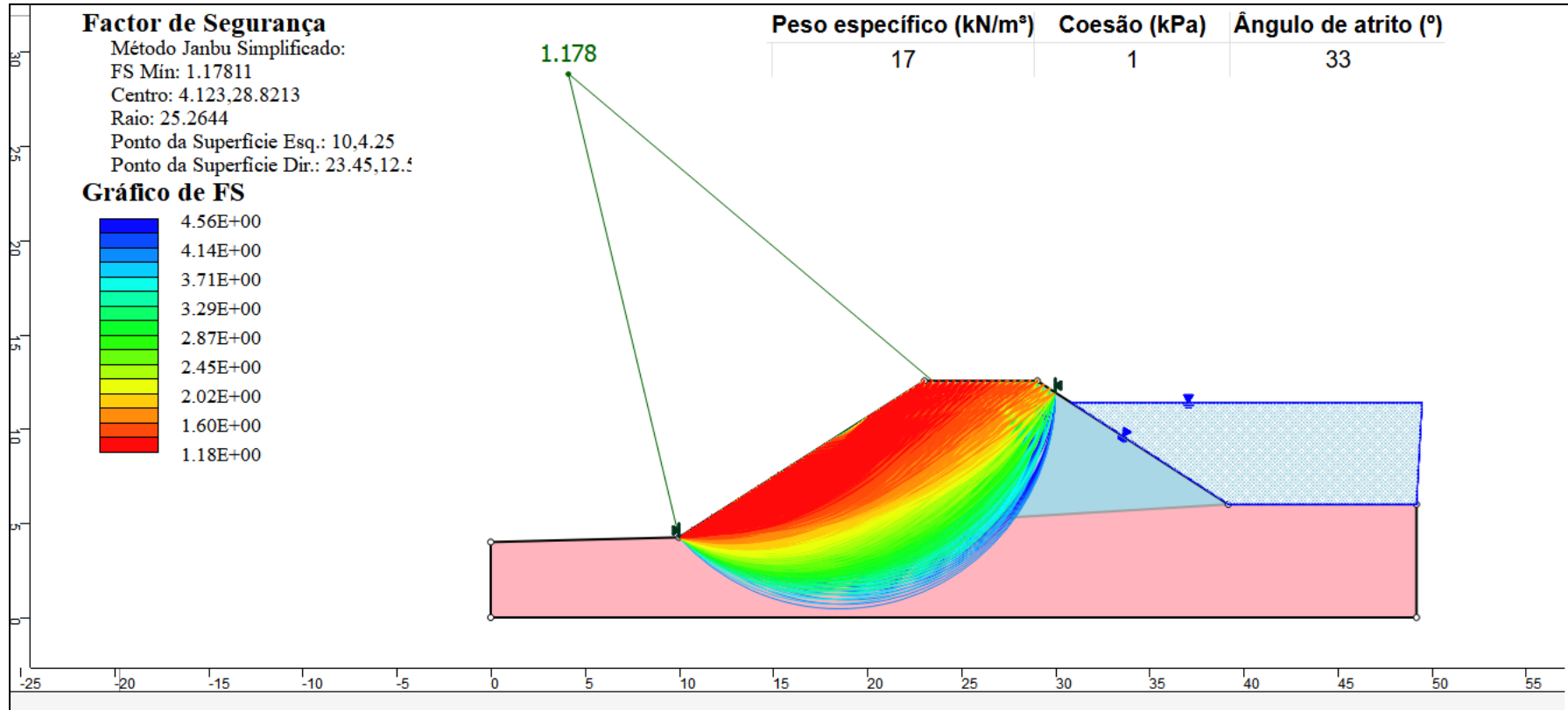
Fonte: Autora, 2024.

Figura 29 - Fator de segurança Bishop da condição 2



Fonte: Autora, 2024.

Figura 30 - Fator de segurança Janbu da condição 2



Fonte: Autora, 2024.

A partir dos resultados obtidos e comparados com os dados apresentados pela NBR 11682 (ABNT, 2009), conforme apresentado no item 4.7.2 que trata dos fatores de segurança mínimos para diferentes níveis de segurança contra danos materiais, ambientais e à vida humana. É possível concluir que tanto a condição 1, quanto a condição 2 encontram-se no nível de fator de segurança considerado baixo.

É amplamente conhecido na literatura que, usualmente, o método de Bishop Simplificado tende a fornecer resultados maiores do que os obtidos pelo método de Janbu Simplificado. Isso ocorre porque o método de Janbu é mais flexível e sua formulação pode ser aplicada tanto para superfícies circulares quanto não circulares. No entanto, sabendo-se que o fator de segurança mínimo é obtido por equilíbrio limite, existem algumas limitações nesse método que precisam ser reavaliadas, pois ele não garante a precisão acurada do fator de segurança da barragem (Duncan, Wright & Brandon, 2014).

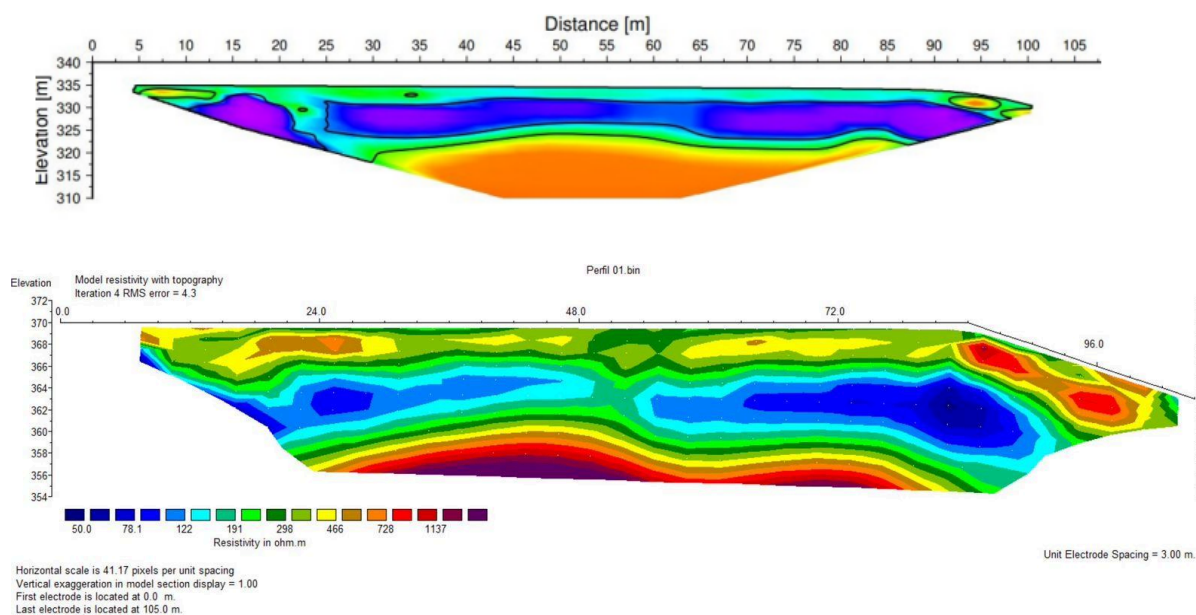
7.4 COMPARAÇÃO DOS DADOS

Neste tópico, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por Miranda (2021) e comparados com os dados do trabalho atual.

7.4.1 Eletroresistividade

A análise dos perfis de eletroresistividade de 2021 e 2024 na barragem revela mudanças significativas nas condições do solo. Embora os perfis tenham sido realizados no mesmo local, eles não têm o mesmo início e fim, e a resistividade é representada de formas diferentes. No perfil de 2021, a distribuição de resistividade mostra variações mais pronunciadas, com áreas de alta e baixa resistividade, indicando uma maior heterogeneidade no solo. Em 2024, a distribuição parece mais homogênea, com predominância de áreas de baixa resistividade, sugerindo um aumento na saturação do solo.

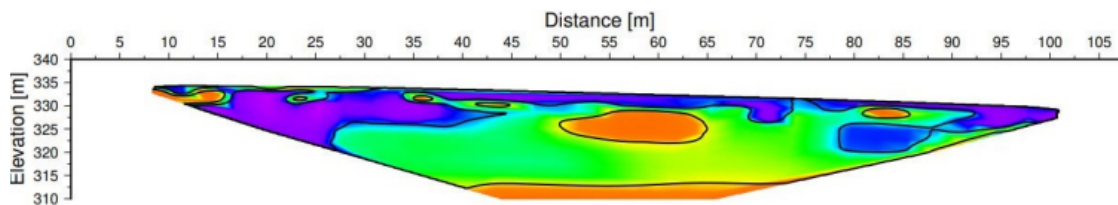
Figura 31 - Comparação perfil 1 (a) 2021 (b) 2024

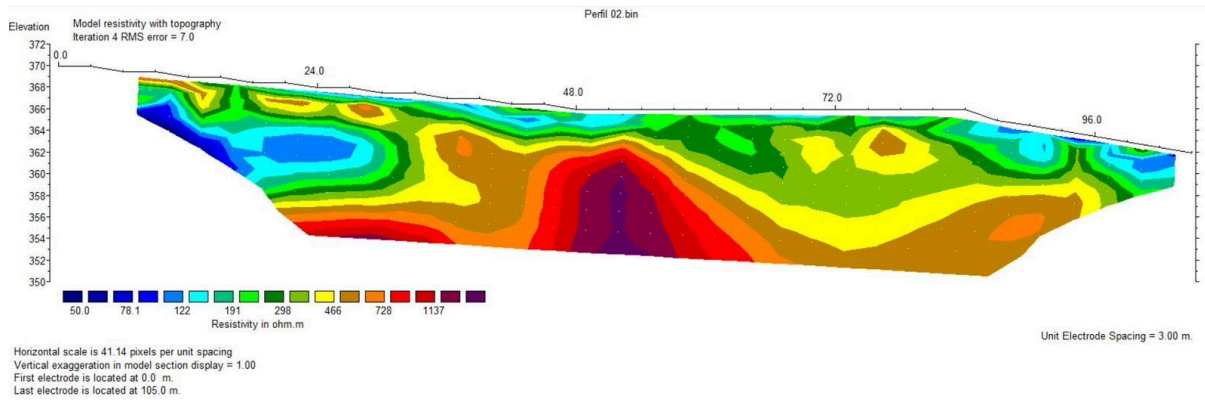


Fonte: Modificado Miranda (2021)

Em 2021, a resistividade varia significativamente, com áreas bem definidas de alta e baixa resistividade, sugerindo uma maior heterogeneidade no solo. Em 2024, a resistividade apresenta uma distribuição mais uniforme, com predominância de áreas de baixa resistividade, indicando um aumento na saturação do solo. Essas mudanças podem refletir alterações nas características geotécnicas do solo devido a fatores ambientais ou outras condições que afetam a barragem. O monitoramento contínuo dessas variações é essencial para assegurar a estabilidade e segurança da estrutura.

Figura 32 - Comparação perfil 2 (a) 2021 (b)2024





Fonte: Modificado Miranda (2021)

7.4.2 Fator de segurança

A tabela 5 apresenta os valores dos fatores de segurança calculados pelos métodos de Bishop e Janbu em três diferentes condições de análise de estabilidade de taludes.

Tabela 5 - Comparação dos fatores de segurança

Valores dos fatores de segurança		
	Bishop	Janbu
Miranda (2021)	1,561	1,467
1º condição (2024)	1,304	1,268
2º condição (2024)	1,211	1,178

Fonte: Autora, 2024.

Em 2021, o fator de segurança calculado por Miranda foi de 1,561 usando o método de Bishop e 1,467 pelo método de Janbu. Em 2024, sob a primeira condição, os valores dos fatores de segurança diminuíram para 1,304 e 1,268, respectivamente. Na segunda condição de 2024, houve uma nova redução, com os fatores de segurança caindo para 1,211 pelo método de Bishop e 1,178 pelo método de Janbu. Observa-se uma tendência de diminuição dos fatores de segurança ao longo do tempo e sob diferentes condições, indicando um possível aumento do risco de instabilidade dos taludes analisados.

A redução nos fatores de segurança entre 2021 e 2024 pode ser indicativa de mudanças nas condições geotécnicas, ambientais e impactos climáticos, particularmente devido à saturação do solo. Alterações nas propriedades do solo, como coesão, peso específico e ângulo de atrito, podem ter contribuído para essa diminuição dos fatores de segurança. Essas mudanças devem ser investigadas detalhadamente para garantir a segurança e a estabilidade dos taludes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações geofísicas realizadas com eletroresistividade e georadar demonstraram-se metodologias satisfatórias para o estudo da integridade física e da estabilidade do talude da Barragem Fonte do Mato.

Por esse motivo, aconselha-se que estudos mais robustos continuem sendo realizados no local. Recomenda-se que, para trabalhos futuros, a continuação do monitoramento da barragem continue utilizando métodos geofísicos e modelagens. Além disso, considerando que os parâmetros geotécnicos são muito sensíveis a pequenas variações de valores, sugere-se uma campanha de coleta de dados mais abrangente, com pontos dispersos ao longo da barragem, a fim de que as condições naturais do solo sofram o mínimo de perturbação possível e os novos valores ensaiados possam ser comparados com os deste estudo. Adicionalmente, aconselha-se que o material para amostragem seja coletado em camadas mais profundas do talude. Sabe-se também que o nível de água do reservatório é um parâmetro muito sensível a pequenas variações e, por esse motivo, para que seja obtido um valor com maior precisão, sugere-se a realização de sondagens a percussão no local. Em resumo, é essencial que estudos mais robustos continuem sendo realizados no local para assegurar a precisão e a confiabilidade das análises de estabilidade da barragem.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6459: Solo - **Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. NBR 6508: Solo - **Determinação da densidade real dos grãos**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 7180: Solo - **Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. NBR 7250: **Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos**. Rio de Janeiro, 1982.

Almeida, M.S.S., e Ferreira, P.E. (2010). **Métodos Geofísicos Aplicados ao Estudo de Barragens de Terra**. Revista Brasileira de Geofísica, 28(3), 451-464.

ANDRADE, A.; SILVA, D. A. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS FACULDADE DE GEOFÍSICA **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO** (2010) Disponível em: <https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/1746/1/TCC_InvestigacaoGeofisicaCaratateua.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BISHOP, A.W.(1955). **The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes**. *Geotechnique*, Vol. 5, p. 7-17.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a **Política Nacional de Segurança de Barragens**

CARMINATTI, Thiago Bock. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2023.

CASTRO, W. J. - Síntese de **Estudos de Estabilidade de Taludes de Minas de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero** - MG Ouro Preto: UFOP 2004.188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. **MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO**. HOLOS - ISSN 1807-1600, v. 8, p. 77–85, 2017.

Carvalho, D. **BARRAGENS: UMA INTRODUÇÃO PARA GRADUANDOS.** Campinas. 473 p., 2011.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul.** Escala 1:750.000. Porto Alegre RS. 2008.

Costa, J.P., e Andrade, C.R. (2017). "**Avaliação de Estabilidade de Barragens de Terra Utilizando Técnicas Geofísicas.**" Revista de Engenharia Civil

COSTA, Walter Duarte. Geologia de Barragens. Ed, São Paulo: Oficina de Textos, 2012. CRUZ, P. T. **100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). **Soil Strength and Slope Stability.** John Wiley & Sons.

EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015. 71 p.

FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade.** 2009. 184 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, MG. 2009.

Gaioto, N. (2003) – **INTRODUÇÃO AO PROJETO DE BARRAGENS DE TERRA E DE ENROCAMENTO.** USP - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Geotecnia.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering.** Prentice-Hall, 1981.

Janbu, E. N. (1958). **Stability Analysis of Slopes with the Swedish Slip Circle Method.** In Proceedings of the Norwegian Geotechnical Institute (Vol. 40, pp. 40-47).

JUSTUS, Jarbas de Oliveira et al. Geomorfologia. Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística. **Levantamento de Recursos Naturais**, v. 33, p. 313-404, 1986.

JÓNATAS, R. J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento: Ensaios experimentais com aterros homogêneos**. 2013. 96p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Lisboa. 2013.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE São Simão**. 2007. 230 f. dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

Minas Gerais. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. **Proíbe a construção e ampliação de barragens a montante no estado de Minas Gerais**. Diário do Executivo, Belo Horizonte, MG, 26 fev. 2019.

MACHADO, J. L. F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Tese. 2005

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

MIRANDA, Gabriela Macedo. 2021. **Aplicação do método geofísico de eletrorresistividade e de ensaios geotécnicos para análise de integridade e estabilidade de uma barragem de terra**.

NASA. (2022). **Speed of Light**.

OLIVEIRA, J. R. de C. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. 2008. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2327>

Pereira, D.L., e Oliveira, A.C. (2019). **"Uso de Resistividade Elétrica no Monitoramento de Barragens."** International Journal of Geotechnical Engineering

PEREIRA, M. G. et al. **FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202369/1/Formacao-e-caracterizacao-de-solos-2019.pdf>. Acesso em: 16 oct. 2023.

Portaria DAEE nº 3318, de 30 de maio de 2022, do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo)

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons, 1997. p.796.

REZENDE, D. A. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeitos**. Rio de Janeiro, 2003. Trabalho de Conclusão de Curso.

Santos, F.J. (2013). **"Monitoramento Geotécnico de Barragens: Técnicas e Tecnologias."** Editora UFMG, Belo Horizonte.

Silva, R.G., e Lima, L.F. (2015). **"Geofísica na Avaliação de Riscos em Barragens de Terra."** Journal of Applied Geophysics, 118, 25-35.

SILVA, Samara.2018. **Métodos Elétricos: Fundamentos Fenomenológicos e eletrorresistividade sobre contatos verticais**. Disponível em: <<http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Samara-Silva.pdf>>. Acesso em: 27 de outubro de 2023.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2023.

SOUZA; Thiago Coutinho. **Metodologia de Avaliação de Liquefação em Barragens de Rejeito: Uma Abordagem Probabilística**. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: . Acesso em 19 de setembro de 2021. TOMAZ, Plínio. Falhas em Pequenas Barragens: Curso de Manejo de águas pluviais. 2013. 23 p.

STRECK, Edemar Valdir et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS: EMATER/RS-ASCAR, 2008.

TEIXEIRA, W. L. 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**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 17 Jun. 2013.

TELFORD, W. M. Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. Keys, D. A. (1976) **Applied Geophysics**, Cambridge Un. Press, Cambridge.

TELFORD W. M.; GELDART L. P. SHERIFF R. E. 1990. **Applied Geophysics**. 2. ed., [Inglaterra]: Cambridge University Press, 770 p.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons, 1996.

VARGAS, M. (1997). **Introdução à Mecânica dos Solos: Segunda parte, Hidráulica dos solos**. McGraw Hill.

WREGE, M. S., STEINMETZ, S., Reisser Júnior, C., & de ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2012. 2012.