

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIELA MACEDO MIRANDA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DE
ELETORRESISTIVIDADE E DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS PARA
ANÁLISE DE INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA**

CAÇAPAVA DO SUL

2021

GABRIELA MACEDO MIRANDA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DE
ELETORRESISTIVIDADE E DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS PARA
ANÁLISE DE INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas.

Co-orientador: Prof. Me. Diogo Peixoto Cordova

CAÇAPAVA DO SUL

2021

GABRIELA MACEDO MIRANDA

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DE ELETRORRESISTIVIDADE E DE ENSAIOS
GEOTÉCNICOS PARA ANÁLISE DE INTEGRIDADE E ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM
DE TERRA**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 28 de setembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas
Orientador
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Prof. Ms. Diogo Peixoto Cordova
Co-orientador
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Prof^a. Dra. Cibele Claúver de Aguiar
Universidade Federal de Viçosa – UFV

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 06/10/2021, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/10/2021, às 09:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2021, às 14:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Cibele Cláuver de Aguiar, Usuário Externo**, em 07/10/2021, às 15:29, 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 **0632751** e o código CRC **FCD7A2E2**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M672a Miranda, Gabriela Macedo

Aplicação do método geofísico de eletrorresistividade e de ensaios geotécnicos para análise de integridade e estabilidade de uma barragem de terra / Gabriela Macedo Miranda.

129 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2021.

"Orientação: José Waldomiro Jiménez Rojas ".

1. Barragem de terra. 2. Solo. 3. Geotecnia. 4. Geofísica. 5. Estabilidade. I. Título.

“Infelizmente, os solos são feitos pela natureza e não pelo homem e os produtos da natureza são sempre complexos”.

Karl Terzaghi

RESUMO

Os estudos que averiguam as condições de segurança de estruturas geotécnicas são baseados em investigações de possíveis causas associadas à diminuição da estabilidade dos maciços. Com o avanço científico, ao longo do tempo, muitas metodologias foram desenvolvidas e outras aperfeiçoadas, em prol de estabelecer ferramentas cada vez mais criteriosas para a análise e monitoramentos de estruturas dos mais variados portes. As barragens de terra destinadas a reservação de água possuem um papel muito importante para a sociedade, em especial, aquelas destinadas ao abastecimento e manutenção de cidades. A construção dessas barragens deve ser baseada em critérios e normas técnicas de execução a fim de se evitar riscos de rompimento ou extravasamento do nível de água. Além disso, o monitoramento e a realização de estudos periódicos tornam-se fundamentais tendo em vista que patologias podem surgir ao longo do tempo de vida da barragem. Com isso, o presente estudo visa avaliar as condições geológicas geotécnicas do maciço de uma barragem de terra de pequeno porte, localizada no município de Caçapava do Sul (RS). A avaliação foi realizada através da combinação de ensaios geotécnicos de solo, investigação geofísica e análise de estabilidade. Foram realizadas visitas técnicas no local da barragem, executados perfis geofísicos investigativos através do método de eletrorresistividade e realizadas as coletas de solos para ensaios geotécnicos como granulometria, limite de liquidez e cisalhamento direto. A análise da estabilidade do talude foi produzida fazendo-se o uso do método de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado por meio do software Slide2 da Rocscience versão 2021. Os parâmetros utilizados na modelagem foram baseados nos resultados mais críticos, sob condições naturais, obtidos a partir dos ensaios geotécnicos de solo e de parâmetros técnicos de geometria do maciço. Dessa forma, através dos resultados obtidos, a metodologia proposta mostrou-se satisfatória. Os produtos gerados a partir das investigações geofísicas não apresentaram anomalias de alerta, exceto para região localizada no possível contato entre o terreno natural e o vertedouro de concreto, região essa propícia à infiltração de água e, conseqüentemente ao desenvolvimento de patologias no maciço. Ao que se refere ao fator de segurança, o modelo gerado a partir do método Janbu, não apresentou valor mínimo exigido na norma vigente e, por esse motivo, aconselha-se que novos estudos sejam realizados no local.

Palavras chaves: Barragem, Solo, Geotécnica, Estabilidade, Geofísica.

ABSTRACT

The studies that investigate the safety conditions of geotechnical structures are based on investigations of possible causes associated with the decrease in the stability of the rock masses. With scientific advancement, over time, many methodologies have been developed and others have been improved, establish more careful tools for the analysis and monitoring of structures of the most varied sizes. Earth dams intended for water reservoirs play a very important role for society, especially those intended for the supply and maintenance of cities. The construction of these dams must be based on technical criteria and standards of execution in order to avoid risks of rupture or overflow of the water level. In addition, monitoring and periodic studies are fundamental, considering that pathologies may arise during the lifetime of the dam. With this in mind, the present study aims to evaluate the geological and geotechnical conditions of the massif of a small earth dam, located in the municipality of Caçapava do Sul (RS). The evaluation was carried out through a combination of geotechnical soil tests, geophysical investigation and stability analysis. Technical visits were made to the dam site, investigative geophysical profiles were performed using the electroresistivity method, and soil samples were collected for geotechnical tests such as grain size, liquidity limit and direct shear. The slope stability analysis was produced using the Simplified Bishop's and Simplified Janbu's methods using Rocscience's Slide2 software version 2021. 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 rock mass geometry. Thus, through the results obtained, the proposed methodology proved to be satisfactory. The results obtained from the geophysical investigations showed no warning anomalies, except for the region located in possible contact between the natural ground and the concrete spillway. Regarding the factor of safety, the model generated from the Janbu method did not show the minimum value required in the current standard and, for this reason, it is advisable that further studies be conducted on site.

Keywords: Dam, Soil, Geotechnics, Stability, Geophysics.

AGRADECIMENTOS

São tantas passagens e pessoas que gostaria de nomear e agradecer que não conseguiria descrever nessa breve página. Ser grato é uma virtude e, sem dúvidas, tenho a certeza que encerro esse ciclo com esse sentimento.

À minha família, minha base e os responsáveis pelos mais nobres e singelos sentimentos de amor e porto seguro. Deixo aqui a minha imensa alegria e agradecimento por ter vocês ao longo dessa jornada.

Aos laços de amizades que pude construir e ter apoio ao longo dos mais diversos e diferentes períodos durante a graduação. Ao meu companheiro, por todos os momentos que compartilhamos e pela cumplicidade em fazer a vida ser mais leve.

Aos projetos no qual tive a oportunidade de participar, em especial aos vínculos da Unipampa Campus Caçapava do Sul: Grupo de Pesquisa em Toxicologia Ambiental, ao Núcleo de Desenvolvimento Educacional, ao Grupo de Química dos Materiais e ao Programa Escola. Aos gestores, equipes de campo e colegas que tive a oportunidade de conhecer ao longo dos estágios na Geocentro Sondagens e Fundações, na Defesa Civil de Santa Maria e na Suporte Sondagens e Investigações Geotécnicas.

A todas as instituições de ensino por onde passei e tive a oportunidade de aprender sobre o que é ciência, em especial a Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul onde estive a maior parte do tempo ao longo dessa trajetória. A todos os docentes que, apesar dos inúmeros desafios na educação brasileira, possuem paixão pelo que fazem e sabem que ser professor vai muito além de dar aulas e corrigir provas. Em especial, agradeço aos meus orientadores, aos participantes da banca e técnicos que auxiliaram na elaboração desse trabalho. Obrigada pela confiança depositada em mim, pelos conselhos e apoio. Agradeço também a toda equipe da CORSAN de Caçapava do Sul pela oportunidade de realizar este estudo na barragem Fonte do Mato.

E por fim, mas, não menos importante, meu agradecimento por todas as mulheres que me inspiram diariamente e me fazem crer que o reconhecimento e o espaço feminino dentro das geociências é possível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Localização da área de estudo.	21
Figura 02. Vista aérea da Barragem Fonte do Mato em Caçapava do Sul, RS.	22
Figura 03. Ocorrência blocos de sieno-granito na Barragem Fonte do Mato.	25
Figura 04. Mapa geológico da área de estudo.	26
Figura 05. Gráfico de temperaturas registradas em Caçapava do Sul/RS.	27
Figura 06. Gráfico de precipitação na cidade de Caçapava do Sul.	28
Figura 07. Mapa pedológico da área de estudo.	30
Figura 08. Principais elementos de uma barragem de terra homogênea.	35
Figura 09. Principais elementos de uma barragem de terra zonada.	36
Figura 10. Métodos usuais de construção de barragens.	38
Figura 11. Compilação dos modos de falha de barragens, segundo vários autores.	39
Figura 12. Dados associados às principais causas de rupturas de barragens.	40
Figura 13. Modelo esquemático do processo de piping.	41
Figura 14. Representação esquemática do processo de ruptura por galgamento.	43
Figura 15. Evolução do cadastro de barragens.	47
Figura 16. Distribuição das barragens em relação ao uso principal.	47
Figura 17. Arranjo usual para medidas de eletroressistividade.	52
Figura 18. Exemplo da técnica de caminhamento elétrico.	54
Figura 19. Esquema de arranjo dipolo-dipolo em caminhamentos elétricos.	56
Figura 20. Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.	58
Figura 21. Esquema representativo do ensaio de granulometria de finos por sedimentação.	60
Figura 22. Limites de Atterberg dos solos.	61
Figura 23. Esquema do aparelho de Casa Grande usado na determinação do limite de Liquidez.	62
Figura 24. Representação esquemática da resistência de materiais.	68
Figura 25. Esquema representativo da coesão entre partículas.	69
Figura 26. Envoltória do círculo de Mohr.	70
Figura 27. Região alvo do estudo.	75
Figura 28. Localização dos perfis de levantamento geofísico da barragem.	77
Figura 29. (A) Montagem dos equipamentos em campo (B) Visualização geral do levantamento geofísico (C) Conexão do eletrodo, bobina e jacarés; (D) Equipamento SYSCAL utilizado.	78
Figura 30. Localização dos pontos de coleta das amostras de solo.	80
Figura 31. (A) cavas realizadas a jusante do talude; (B) equipe de apoio de campo; (C) material cravado no anel de cisalhamento; (D) armazenamento e identificação das amostras; (E) cavas recobertas com o mesmo material.	81
Figura 32. (A) Amostra sendo destorroada; (B) Material passante na peneira de 2mm; (C) Amostra em repouso com defloculante; (D) Instrumento difusor; (E) Material em proveta de vidro; (F) Material fino em placa petri.	84

Figura 33. (A) Cilindros para p ensaio de limite de plasticidade; (B) Materiais utilizados no ensaio do limite de liquidez (C) Equipamento Casagrande preenchido com material.....	86
Figura 34. Figura 34.(A)Taragem do picnômetro e funil; (B) Material vinculado a bomba de vácuo (C) Pesagem do picnômetro com material.....	87
Figura 35. Registro da coleta do material indeformado através dos anéis de cisalhamento direto.	88
Figura 36. (A) Material cravado no anel; (B) Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto. (C) Amostra cisalhada após execução do ensaio.	89
Figura 37. Carregamento a ser utilizado na prensa de cisalhamento direto.	89
Figura 38. Geometria proposta para a barragem Fonte do Mato.	91
Figura 39. Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.....	94
Figura 40. Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.....	96
Figura 41. Curva granulométrica para os resultados da cava 1 e cava 2.....	100
Figura 42. Diagrama trilinear de classificação do solo.	100
Figura 43. Resultados dos limites de Atterberg inseridos na carta de plasticidade proposta por Casa Grande.....	101
Figura 44. Resultados de cisalhamento direto sob condições saturada e seco da cava 1.....	103
Figura 45. Resultados de cisalhamento direto sob condições saturada e seco da cava 2.....	104
Figura 46. Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado à barragem pelo método de Bishop Simplificado.	107
Figura 47. Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado à barragem pelo método de Janbu Simplificado.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Propriedades elétricas de alguns materiais rochosos.	51
Tabela 02. Quadro comparativo entre alguns dos arranjos utilizados na aquisição de dados geofísicos.	55
Tabela 03. Índices de Atterberg em alguns solos brasileiros.	62
Tabela 04. Classificação dos solos em relação aos valores de IP.	63
Tabela 05. Massa específica da água em função da temperatura, em g/cm ³	65
Tabela 06. Valores típicos de densidade real dos grãos.	66
Tabela 07. Valor mínimo de fator de segurança conforme a NBR 13028/2017.	73
Tabela 08. Coordenadas de localização dos locais de coleta das amostras.	80
Tabela 09. Parâmetros adotados para análise de estabilidade do talude na barragem Fonte do Mato.	90
Tabela 10. Valores de resistividade em diferentes escalas.	92
Tabela 11. Valores dos Limites de Atterberg para as cavas 1 e 2.	101
Tabela 12. Valores do peso específico dos sólidos das cavas 1 e 2.	102
Tabela 13. Resultados de ângulo de atrito, peso específico natural e coesão das cavas 1 e 2.	105
Tabela 14. Resultados das tensões cisalhantes em kPa das cavas 1 e 2.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ANA - Agência Nacional das Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANM - Agência Nacional de Mineração

CGCS - Complexo Granítico Caçapava do Sul

CMPF - Complexo Metamórfico Passo Feio

CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

ESRG - Escudo Sul-Rio-Grandense

FS - Fator de Segurança

GPR - *Ground Penetrating Radar*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICOLD - *International Commission on Large Dams*

IOCS - Inspetoria de Obras Contra as Secas

MDF - Método das Diferenças Finitas

MEF - Método dos Elementos Finitos

NW - Noroeste

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

RSB's - Relatório de Segurança de Barragens

SW - Sudoeste

SP - Potencial Espontâneo

SNIB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

TSG - Terreno São Gabriel

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

UTM - Universal Transversa de Mercator

WGS84 - *World Geodetic System* 1984

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	18
3. JUSTIFICATIVA	19
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
4.1 LOCALIZAÇÃO	20
4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO	23
4.2.1 Geologia regional e local	23
4.3 CLIMA E CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO	27
4.4 CONTEXTO PEDOLÓGICO	29
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
5.1 BARRAGENS	31
5.2 TIPOS DE BARRAGENS	31
5.2.1 Barragens de terra	32
5.2.1.1 Barragens de terra homogênea	34
5.2.1.2 Barragens de terra zoneada	35
5.3 MODELOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS	36
5.3.1 Método da jusante	36
5.3.2 Método da montante	37
5.3.3 Método linha de centro	37
5.4 PRINCIPAIS MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGENS	38
5.4.1 Ruptura por <i>piping</i>	40
5.4.2 Ruptura por <i>overtopping</i> ou galgamento	41
5.4.3 Ruptura por liquefação	43
5.4.4 Ruptura por perda de estabilidade	44
5.5 LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	44
5.5.1 Dados estatísticos associados a barragens	45
5.6 GEOFÍSICA APLICADA À ANÁLISE DE BARRAGENS	48
5.6.1 Métodos geofísicos comuns ao estudo de barragens	48
5.6.2 Propriedades elétricas dos materiais rochosos	50
5.6.3 Método de eletrorresistividade	51
5.6.4 Técnicas e arranjos	53
5.6.4.1 Caminhamento elétrico	53
5.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA	56

5.7.1 Caracterização do solo	56
5.7.1.1 Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento	57
5.7.1.2 Limites de Atterberg	60
5.7.1.3 Ensaio de peso específico	63
5.7.2 Resistência ao cisalhamento do solo	66
5.7.2.1 Ângulo de atrito	68
5.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	70
5.8.1 Métodos de análise de estabilidade	71
5.8.2 Fator de segurança	72
5.8.3 Métodos de equilíbrio limite e cálculo do fator de segurança	73
6. METODOLOGIA	75
6.1 VISITA DE RECONHECIMENTO DA ÁREA DE ESTUDO	76
6.2 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO	76
6.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA DOS SOLOS	78
6.3.1 Coleta de amostras em campo	79
6.3.2 Ensaio executados em laboratório	82
6.3.2.1 Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento	82
6.3.2.2 Limites de Atterberg	84
6.3.2.3 Peso específico real dos grãos	86
6.3.3 Cisalhamento direto	87
6.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE	90
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
7.1 Análise geofísica	91
7.2 Caracterização geológica geotécnica dos solos	97
7.2.1 Ensaio de granulometria	98
7.2.2 Limites de Atterberg	100
7.2.3 Peso específico real dos grãos	102
7.2.4 Cisalhamento direto	102
7.2.5 Análise de estabilidade do talude	106
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens é tão antiga quanto a História do homem na sociedade. Há registros da construção de barragens em praticamente todas as culturas (CRUZ, 1996). No Brasil é crescente o número de barragens construídas com o intuito de propiciar benefícios à sociedade, para fins de abastecimento, aquicultura, capacitação de água, regularização, uso industrial, estocagem de resíduos, entre outros (ANDRADE, 2012). No entanto, ainda que as barragens tragam bastantes benefícios para a sociedade, seus impactos sobre as áreas vizinhas incluem diversos fatores, principalmente no aspecto relacionado à segurança. Os graves impactos econômicos, sociais e ambientais provenientes das rupturas das barragens têm criado uma forte demanda da sociedade para minimizar o risco dessas obras.

Os estudos de avaliação das condições geotécnicas e segurança estrutural dos maciços de barragens de terra é um assunto de grande valia e de interesse tanto para a Geotecnia quanto para a Sociedade. Além de analisar quais problemáticas podem estar associadas ao aumento ou diminuição da segurança do maciço, também é possível avaliar práticas adequadas para o bom gerenciamento e monitoramento dessas estruturas.

Maciel (2008), afirma que a Geologia Aplicada à Engenharia é uma área de muita importância aos estudos voltados a barragens, principalmente porque ela atua fornecendo os condicionantes geológicos necessários ao desenvolvimento dos projetos. O desenvolvimento de obras de barragens necessita do conhecimento geológico da área onde serão construídas para que obtenha êxito, minimizando os custos e maximizando o fator de segurança, uma vez que os condicionantes geológicos estão intimamente relacionados à estabilidade das mesmas.

O estudo de estabilidade de barragens pode ser realizado a partir de técnicas indiretas, através do uso de métodos geofísicos e sondagens, como também por meios diretos, por meio de coleta de amostras *in situ* e de análise crítico-visual de estruturas e geometrias do corpo do barramento. O emprego de métodos geofísicos para a análise de estabilidade de barragens tem sido

cada vez mais comum. Isso porque os métodos geofísicos, geralmente, apresentam-se como investigações rápidas, não destrutivas e de baixo custo para o projeto. Alinhado ao uso desses métodos, os ensaios geotécnicos também são muitos eficazes e de fácil manuseio, sendo responsáveis por fornecer dados que agregaram a interpretação dos métodos geofísicos.

Sob esse prisma, a partir da combinação de diferentes metodologias investigativas, procuram-se resultados que possam avaliar as condições do maciço das barragens bem como o monitoramento dessas estruturas. Ademais, o uso combinado de investigações possibilita respostas que permitem discussões e avaliações mais fundamentadas com base em critérios científicos passíveis de correlação.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é avaliar as condições geológicas-geotécnicas de um maciço de barragem de terra, através da combinação de investigações geofísicas, ensaios geotécnicos de solo e de ferramentas de modelagem de estabilidade.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- a) Realizar visitas técnicas preliminares para o reconhecimento da área;
- b) Realizar ensaios de caracterização física e mecânica dos solos através dos ensaios geotécnicos: Ensaio de Granulometria, Limites de Atterberg, Ensaio de Peso Específico do Solo e Ensaio de Cisalhamento Direto;
- c) Executar perfis investigativos de geofísica no talude de jusante do maciço através do método de eletrorresistividade com o intuito de caracterizar as variações horizontais e verticais da barragem;
- d) Determinar o fator de segurança do talude de jusante do maciço através do Método de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado a partir do Software Slide;

e) Correlacionar os dados dos ensaios geotécnicos de solo, os produtos da investigação geofísica e os resultados da modelagem computacional a fim de avaliar a estabilidade do talude.

3. JUSTIFICATIVA

Investigações geotécnicas em barragens de terra é um tema de grande relevância na geotecnia e para sociedade, de forma geral. A fim de se estabelecer o acompanhamento e garantir a segurança dessas estruturas, a realização de estudos com base em metodologias científica é indispensável.

A barragem Fonte do Mato, alvo desse estudo, foi construída no ano de 1991 com a proposta de ser uma barragem de operação secundária para abastecimento da cidade de Caçapava do Sul. No entanto, em função de um período de estiagem que assolou a cidade no fim do ano de 2019 e no início de 2020, uma obra emergencial de ampliação foi realizada com o intuito de desassorear o terreno e duplicar a capacidade do reservatório. A partir dessa obra, a Barragem Fonte do Mato, tornou-se a principal barragem de reservação de água para o abastecimento da cidade.

Sob esse contexto e considerando que não existem estudos que avaliaram as condições de segurança da barragem, este trabalho tem como finalidade executar uma metodologia investigativa no local de forma apresentar as condições da integridade e estabilidade da mesma. Os resultados obtidos com esse trabalho serão disponibilizados a companhia responsável pela administração da barragem, Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), com o propósito de contribuir com dados técnicos científicos para o monitoramento da barragem.

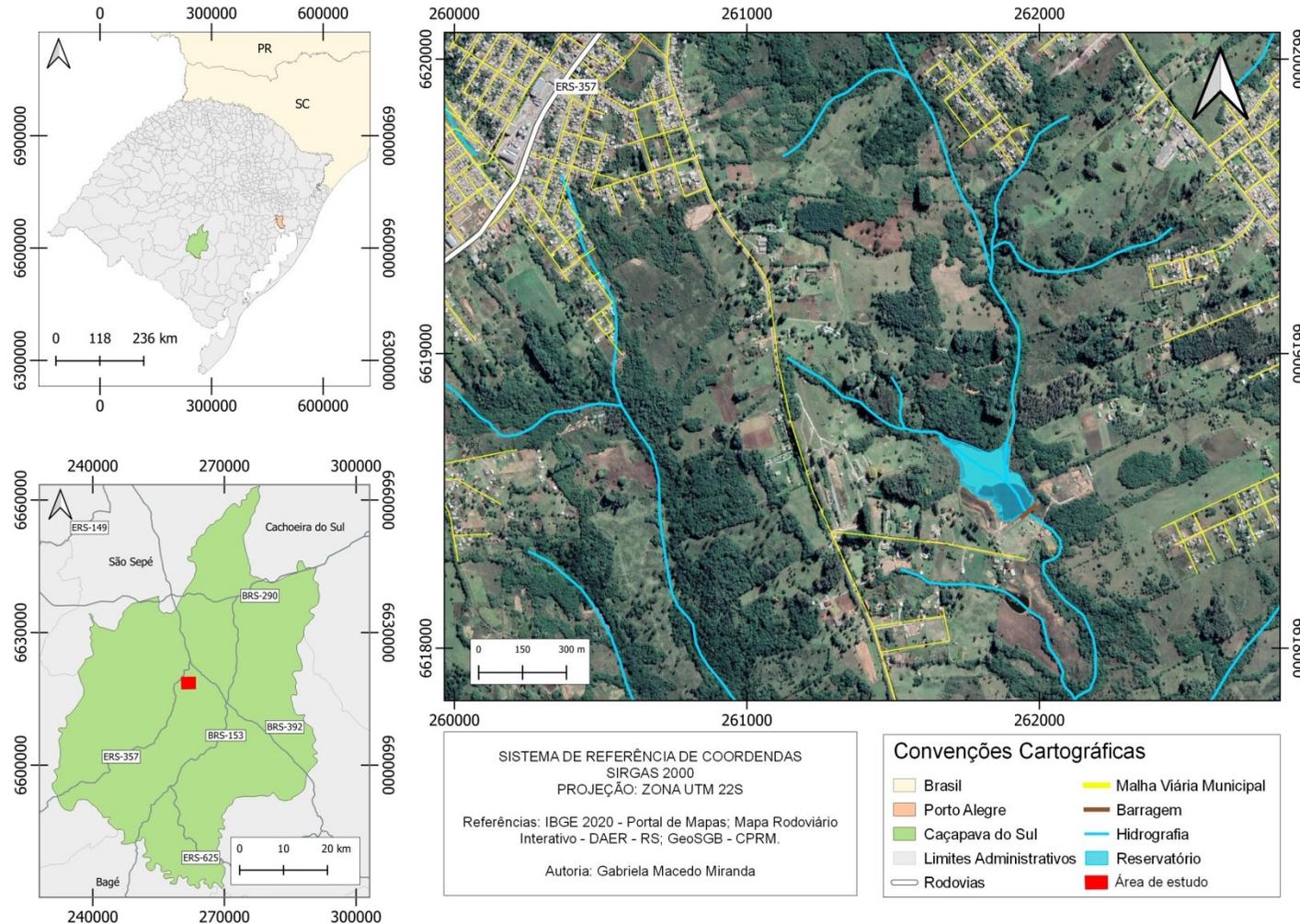
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nos tópicos subsequentes serão abordados aspectos relacionados à localização da área de estudo. Para abordar a geologia, na qual o presente estudo está inserido, buscou-se subdividi-la no contexto regional e local.

4.1 LOCALIZAÇÃO

O barramento está situado no município de Caçapava do Sul à cerca de 5.0km da mancha urbana e 260 km a sudoeste da capital Porto Alegre. Distante cerca de 8km do Campus Caçapava do Sul da Universidade Federal do Pampa, o acesso a área da barragem (Figura 01) se dá por meio da Estrada do Salso localizada ao sul do município no empreendimento administrado pela CORSAN. Trata-se de um barramento de pequeno porte, construído em 1991 com fins de armazenamento de água para uso da cidade de Caçapava do Sul (Figura 02).

Figura 01. Localização da área de estudo.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 02. Vista aérea da Barragem Fonte do Mato em Caçapava do Sul, RS.



Fonte: Autora, 2021.

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

Nesta seção serão descritas as características geológicas da área de estudo a partir da revisão bibliográfica pertinentes em escala regional a local.

4.2.1 Geologia regional e local

Segundo Almeida e Hasui (1984), a área de estudo encontra-se no Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG), situada na porção Meridional da Província Mantiqueira. Conforme mencionado por Hartmann, Chemale e Philipp (2007), o ESRG é resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental, na qual, a maior contribuição ocorreu durante dois ciclos orogênicos, o Transamazônico e o Brasileiro. Essa região é representada por terrenos rochosos formados entre o Pré-Cambriano ao início do Paleozóico. São constituídos por associações de rochas ígneas de composição granítica, as quais, normalmente, são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, representadas por um complexo de gnáissico de rochas máfico-ultramáficas, xistos e mármore e depósitos vulcano-sedimentares.

Solani Jr (1986), afirma que o ESRG é subdividido em quatro terrenos: Terreno Taquembó, Encruzilhada do Sul, Dom Feliciano e São Gabriel, sendo esse último o terreno no qual a área de estudo está inserida. O Terreno São Gabriel (TSG) é limitado a sul pela Zona de Cisalhamento Ibaré, a leste por um sistema de falhas de direção NE-SW, e a oeste e norte está coberto pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná (BOSCO, 2019). O TSG é marcado pela presença de rochas da Suíte Granítica Caçapava do Sul, do Complexo Metamórfico Vacacaí e rochas da Bacia do Camaquã.

O Complexo Metamórfico Vacacaí de idade Neoproterozóica aparece em sua unidade vulcano-sedimentar caracterizado por xistos provenientes de metapelitos, grafita xistos, quartzitos, anfíbolitos e lentes de mármore (CPRM, 2016).

Segundo Babinski et al., (1996), a Bacia do Camaquã apresenta orientação NE-SW, sendo margeada pelos cinturões Tijucas e Dom Feliciano a

leste onde dominam gnaisses granodioríticos a tonalíticos, rochas metavulcano-sedimentares e ultramáficas; e disposta sobre o Terreno São Gabriel e Cráton Rio de La Plata, a oeste com rochas paleoproterozóicas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. A bacia teve seu desenvolvimento relacionado aos estágios finais da orogênese Brasileira/Panafricana e sua deposição compreende quatro pulsos tectonovulcano-sedimentares consecutivos que estão limitados por discordâncias angulares (PAIM et al, 2000).

O município de Caçapava do Sul está inserido na Suíte Granítica de Caçapava do Sul (Figura 04) e é marcada pela ocorrência de uma intrusão ígnea granítica em escala de batólito e circundado por um cinturão de metamorfitos (CGCS; Bitencourt, 1983). A Suíte Granítica Caçapava do Sul constitui-se de sienogranitos com idade aproximada de 562 ± 8 Ma que contornam e intrudem monzogranitos a allanita granodioritos, médios à finos dominantes da porção central (REMUS, 2000). O contato das rochas graníticas com as encaixantes metamórficas é marcado por foliação milonítica ao longo das bordas que é concordante com a foliação da sequência metamórfica que as envolvem (BITENCOURT, 1983).

Em virtude das dificuldades advindas com a pandemia, os documentos descritivos a respeito da construção da barragem não foram fornecidos pela CORSAN. No entanto, a partir de relatos de alguns funcionários da empresa e de moradores locais, os taludes da barragem foram construídos a partir de materiais de empréstimo do próprio município de Caçapava do Sul.

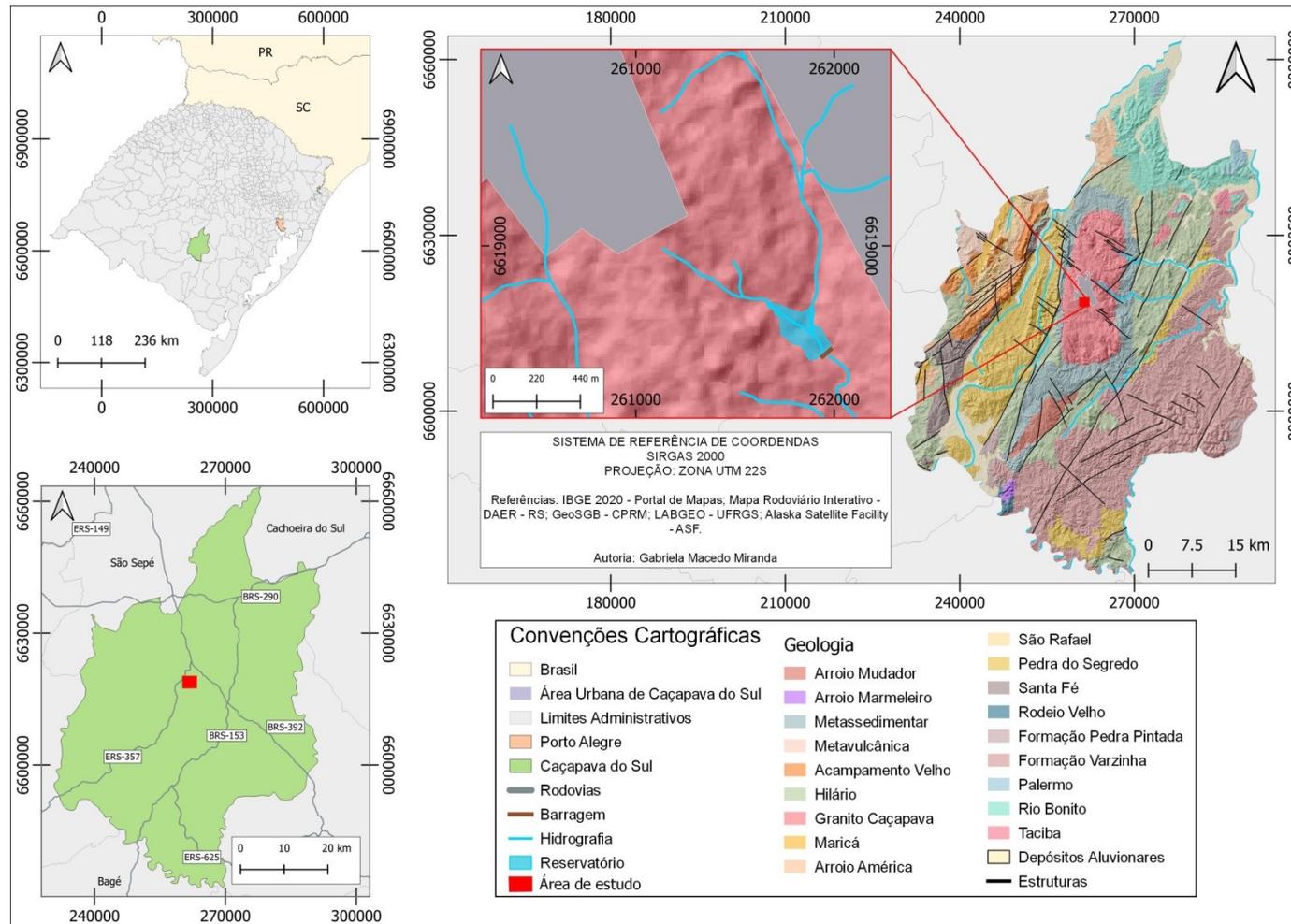
Sabendo-se que o local de estudo está inserido na Suíte Granítica de Caçapava do Sul, subteve-se que o material utilizado na construção do talude da barragem seja construído sobre um embasamento cristalino. No local, foram registradas alguns blocos de sieno-granitos com dimensões centimétricas, conforme ilustra a Figura 03.

Figura 03. Ocorrência blocos de sieno-granito na Barragem Fonte do Mato.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 04. Mapa geológico da área de estudo.



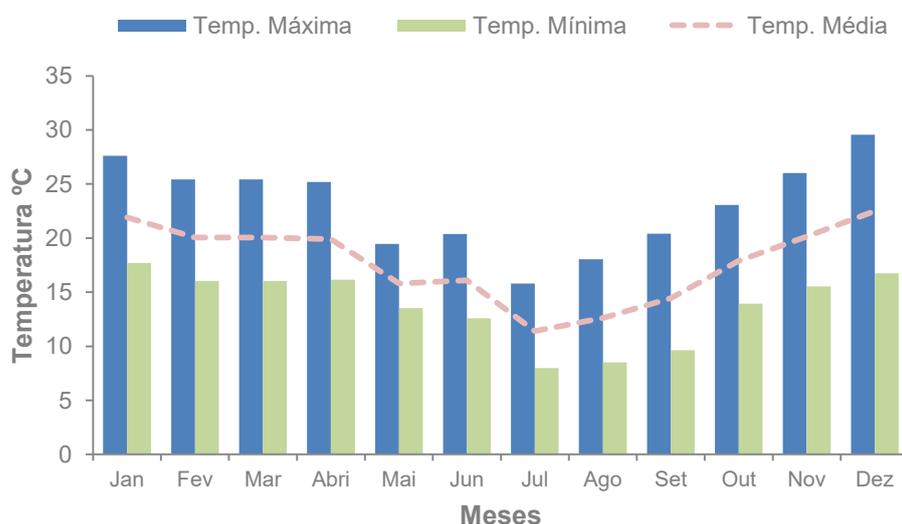
Fonte: Autora, 2021.

4.3 CLIMA E CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

De acordo com a classificação de Köppen (1953), o estado do Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada ou "C" e no tipo fundamental "Cf" ou temperado úmido. No Estado este tipo "Cf" se subdivide em duas variedades específicas, Cfa¹ e Cfb² (MORENO, 1961).

Conforme os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média mensal registrada na cidade de Caçapava do Sul é de 17°C (Figura 05).

Figura 05. Gráfico de temperaturas registradas em Caçapava do Sul/RS.



Fonte: Adaptado do INMET, 2019.

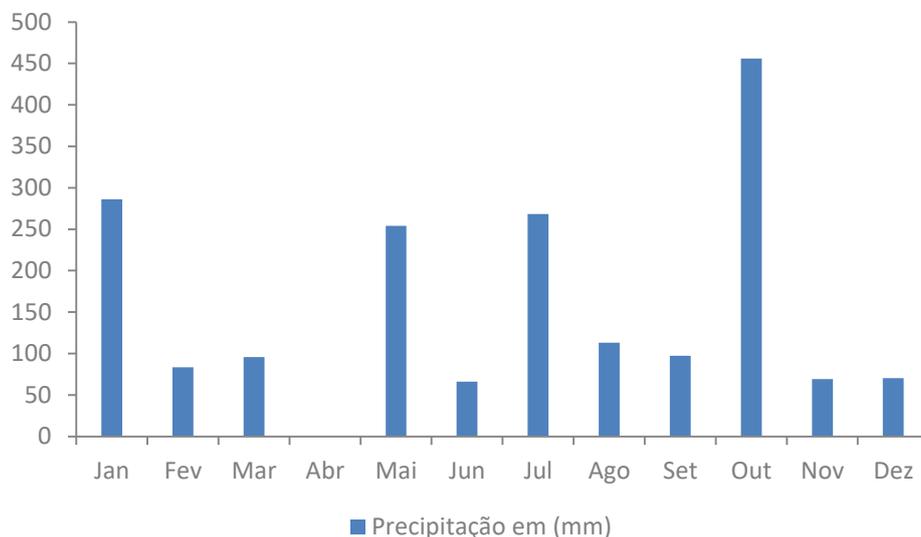
Com relação ao regime de chuvas, a média de precipitação mensal registrado foi de 155mm, sendo os meses de janeiro, maio, julho e outubro com as maiores concentrações de chuvas. Os demais meses apresentaram

¹ Cfa - Clima subtropical, com verão quente. As temperaturas são superiores a 22°C no verão e com mais de 30 mm de chuva no mês mais seco. Esse tipo de clima predomina no litoral e sul do Rio Grande do Sul, litoral de Santa Catarina, planalto norte e centro-leste do Paraná, bacias dos rios Uruguai e Paraná (Golfari et al., 1978).

² Cfb - Clima temperado mesotérmico, com verões frescos e sem estação seca definida (IAPAR, 2008).

características de períodos mais secos, com o mês de abril com ausência de chuvas (Figura 06).

Figura 06. Gráfico de precipitação na cidade de Caçapava do Sul.



Fonte: Adaptado do INMET, 2019.

Com base em produtos de sensoriamento remoto disponíveis, perfis de campo e estudos geomorfológicos regionais anteriores, o estado do Rio Grande do Sul foi compartimentado em oito domínios geomorfológicos: Planície Costeira Gaúcha, Depressão Central Gaúcha, Cuesta de Haedo, Escarpa da Serra Geral, Planalto dos Campos Gerais, Planalto Dissecado do Rio Uruguai, Planalto de Uruguaiana e Planalto Sul-Rio-Grandense (CPRM, 2010).

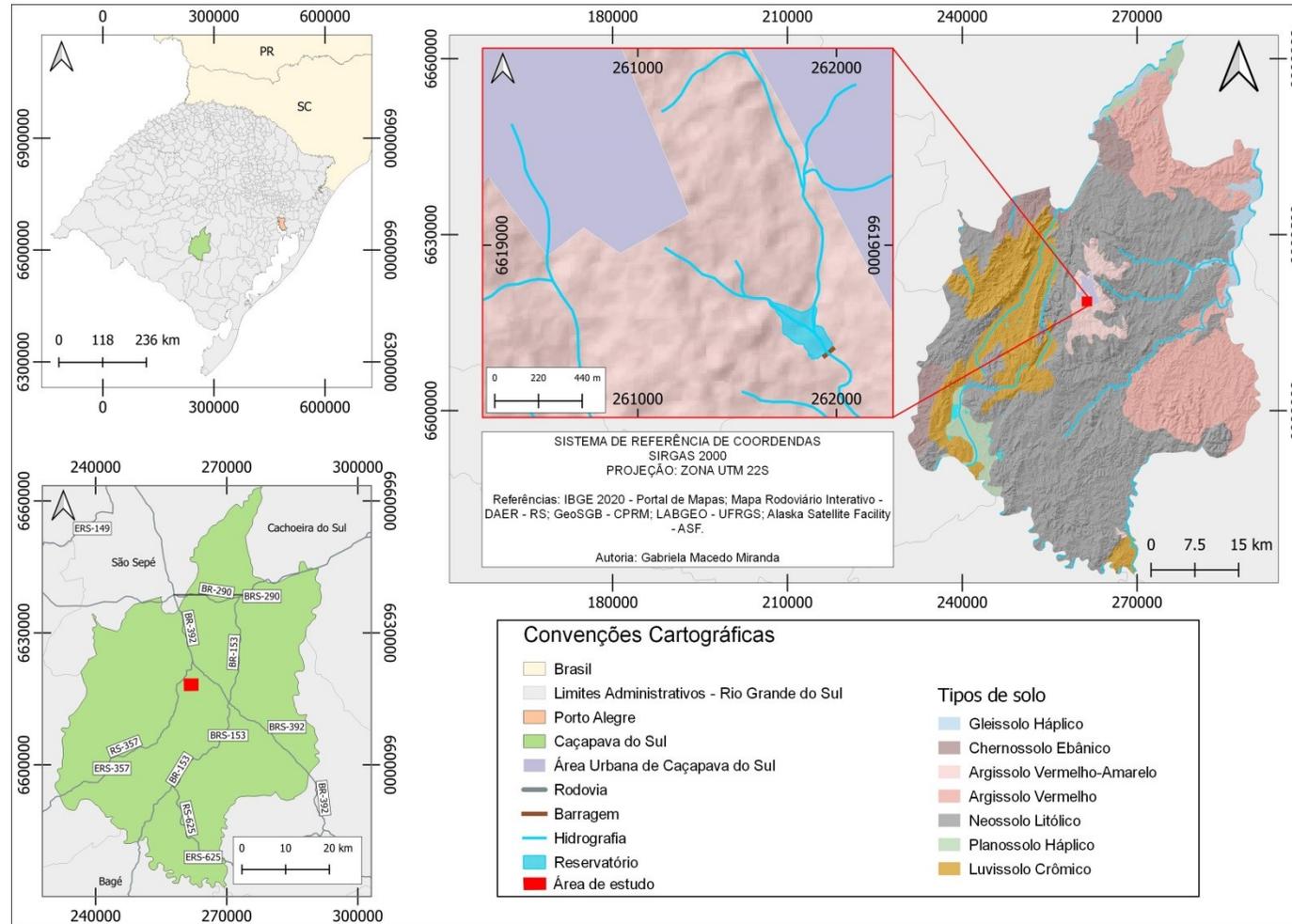
O contexto geomorfológico da área de estudo situa-se no Planalto Sul-Rio-Grandense. Segundo AB'SABER (1998), trata-se de um planalto desnudado em formato dômico ou uma paleoabóboda, regionalmente englobado na denominada Campanha Gaúcha. Predominam-se relevos medianamente dissecados, apresentando colinas e coxilhas, com extensas vertentes suaves a moderadas e cotas variando entre 150 – 600 metros (CPRM, 2010).

4.4 CONTEXTO PEDOLÓGICO

Streck et al. (2008) definem doze classes de solos para o estado do Rio Grande do Sul: Argissolo, Cambissolo, Chernossolo, Espodossolo, Gleissolo, Latossolo, Luvisso, Neossolo, Nitossolo, Organossolo, Planossolo, Plintossolo e Vertissolo.

Na área de estudo encontram-se Argilossolos Vermelho Amarelo Distróficos. Conforme Lemos (1973), esses solos ocorrem em relevo suave ondulado até relevos fortemente ondulados, especialmente, formados por coxilhas e morros. Apresentam baixa fertilidade natural, devido à acidez e alta saturação por alumínio e necessitam do manejo com corretivos e fertilizantes para neles se desenvolverem campo nativo ou lavoura. A vegetação natural é esparsa e de pequeno porte. Conforme Streck et al. (2008), são solos geralmente profundos a muito profundos, bem drenados e oriundos dos mais diversos tipos de rochas, como basaltos, granitos, arenitos e outros sedimentos. O mapa pedológico da área de estudo é apresentado a seguir na figura 07.

Figura 07. Mapa pedológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado da CPRM, 2021.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 BARRAGENS

Segundo MELLO (1963), as barragens de reservatório são definidas como estruturas artificiais construídas transversalmente à direção de um escoamento de um curso permanente ou intermitente de água. Possuem tamanhos variados, desde pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto. Os principais motivos que levam a criação de barragens são: aproveitamento hidrelétrico, regularização de vazões do curso d'água, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, contenção de rejeitos entre outros motivos. Acredita-se que as primeiras estruturas de barragens tenham surgido em função da necessidade de armazenamento de água no registro de regiões consideradas o berço da civilização como o Egito e Índia.

No Brasil, de acordo dados da ANA (2012), a construção de barragens e açudes foi impulsionada com o intenso período de seca na região nordeste entre os anos de 1877-79. Foi então que no ano de 1909 com a criação da Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), posteriormente denominada Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) que políticas importantes foram desempenhadas com o objetivo de mitigar novos problemas decorrentes da estiagem. Foram construídos reservatórios de pequenos e médios portes nessa região. Pode-se dizer que essa política de acumulação de água foi bem-sucedida e assegurou condições para a vida da população no interior (ANA, 2012). Até a década de 1970, já havia mais de cinco mil grandes barragens construídas em todo o mundo (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

5.2 TIPOS DE BARRAGENS

Conforme Gaioto (2003), as barragens podem ser de diferentes tipos, dependendo da sua finalidade. As mais usuais, geralmente, são relacionadas

aos materiais de construção e à sua geometria. Quanto ao material construtivo, as barragens convencionais podem ser divididas em quatro tipos:

- ❖ Terra (homogênea e zonada),
- ❖ Enrocamento,
- ❖ Concreto ou
- ❖ Mista.

5.2.1 Barragens de terra

De acordo com Matos, Silva, Pruski (2012) as barragens de terra, devido à facilidade construtiva, foram às primeiras estruturas construídas pela humanidade. Antigamente, o material de composição para o corpo da barragem era muitas vezes transportado manualmente e compactado através de pisoteamento animal e de humanos (MASSAD, 2003).

Com o avanço científico no âmbito da mecânica de solos após a década de 30 muitas melhorias foram observadas quanto às técnicas de construção de barragens (CAMARERO, 2016). Importantes nomes na área de mecânica dos solos como Karl Terzaghi e Arthur Casagrande desenvolveram procedimentos básicos de avaliação utilizados até hoje como: a investigação completa sobre as condições de fundação e materiais, aplicação de técnicas e habilidades específicas para o desenvolvimento do projeto e planejamento cuidadoso e controlado dos métodos de construção (ARTHUR, 1973). Segundo Massad (2003), no ano de 1947 foi construída a primeira barragem no Brasil com o emprego de técnicas desenvolvidas por Terzaghi e Casagrande no projeto e construção.

No geral, as barragens de terra apresentam vantagens como: utilização de materiais naturais do local, projeto construtivo simplificado, menores investimentos, fundações mais simples devido a bases largas, facilidade na construção. Já, entre as desvantagens se destacam: maior susceptibilidade a danos e rompimento com a passagem de água, vertedouros de difícil projeção e construção, fragilidade devido à má compactação, necessidade de

manutenção contínua evitando infiltrações, erosões e outros danos (CARVALHO, 2008).

Embora sejam muitos os avanços ao longo do tempo quanto às tecnologias empregadas à construção de barragens, muitos empreendimentos ainda não possuem acesso a essas tecnologias. Em várias propriedades rurais é comum encontrar barragens construídas sem qualquer dimensionamento técnico, e, na maioria das vezes, construídas sem obedecer a critérios básicos de segurança, quase sempre no intuito de reduzir custos. Entretanto, é de responsabilidade do proprietário buscar um profissional devidamente habilitado e capacitado para a elaboração de um projeto construtivo da barragem, sua execução, obedecendo a normas técnicas de segurança (CARVALHO, 2008). A avaliação das condicionantes geológicas do terreno é de extrema importância para um projeto bem sucedido (ARTHUR, 1973).

Para Matos, Silva, Pruski, (2012), pequenas barragens de terra são aquelas com até 10 metros de altura. Carvalho (2008) registra que historicamente, as pequenas barragens de terra eram recomendadas para alturas inferiores a 15 metros, porém, com a modernização das técnicas de projeto e construção, recomendam-se que as barragens de terra (homogênea e zonada) não ultrapassem os 25 metros de altura, atendendo a critérios de segurança.

Segundo o Guia Prático de Pequenas Barragens da Agência Nacional de Águas (ANA), os projetos deverão conter minimamente os seguintes conteúdos (BRASIL, 2016).

- ❖ Levantamento planialtimétrico da área a ser saturada pelo reservatório, com a estimativa da área saturada e volume do reservatório, bem como a localização da barragem;
- ❖ Estudos hidrológicos para a determinação da vazão disponível para barramento e vazão máxima de cheia com base em precipitações associadas a intensidade, duração e características da bacia hidrográfica;
- ❖ Dimensionamento hidráulico da descarga de fundo, tomada d'água e extravasor com base nos estudos hidrológicos;

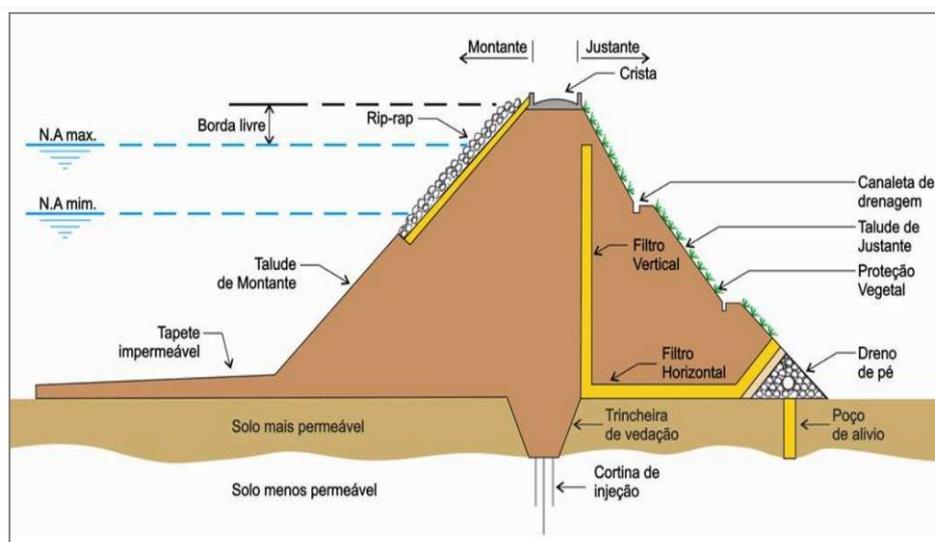
- ❖ Reconhecimento do terreno de fundação por meio de poços ou sondagens e análise de amostras indeformadas e ensaios in situ para determinação das características de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade;
- ❖ Estudo dos locais de empréstimo de solos para construção do aterro e a avaliação dos respectivos volumes, ensaios laboratoriais de identificação e de compactação;
- ❖ Dimensionamento estrutural com a geometria da barragem (cotas, borda livre, inclinação dos taludes, altura da barragem e características e dimensões dos diferentes tipos de maciços constituintes, detalhamento dos elementos, etc.) e a proposta de um plano simplificado de segurança da barragem;
- ❖ Levantamento e caracterização da zona a jusante da barragem, afetada por uma eventual ruptura;
- ❖ Medidas mitigadoras dos impactos ambientais, que incluam a recuperação das áreas de empréstimo, a proteção do reservatório em relação ao assoreamento e a alteração da qualidade da água.

As barragens de terra podem ser subdivididas em barragens de terra homogênea e barragens de terra zonada. A seguir, serão comentadas as características de ambas as barragens, mas com maior ênfase as barragens de terra homogênea por ser o alvo deste projeto.

5.2.1.1 Barragens de terra homogênea

As barragens homogêneas são constituídas de um único tipo de material, geralmente de baixa permeabilidade, podendo apresentar elementos drenantes. Marangon (2004) salienta a importância de que os taludes nesse tipo de construção apresentem inclinações suaves, favorecendo um maior controle da estabilidade da barragem. A figura 08 apresenta os principais elementos que compõe uma barragem de terra homogênea.

Figura 08. Principais elementos de uma barragem de terra homogênea.



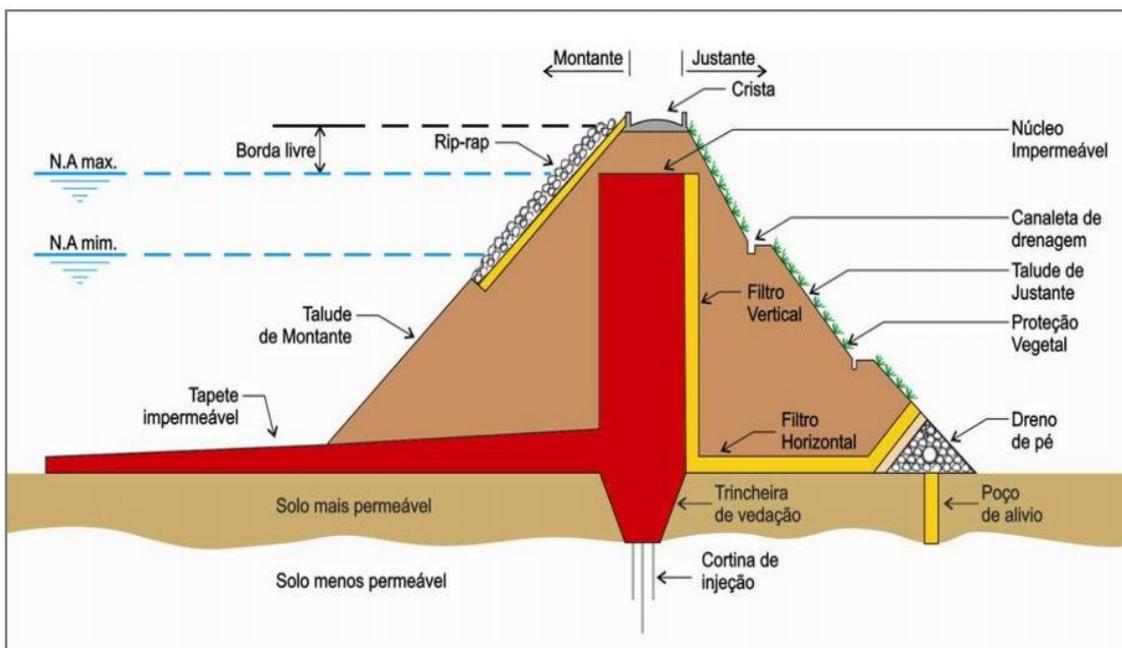
Fonte: Carvalho, 2011.

5.2.1.2 Barragens de terra zoneada

As barragens de terra zoneadas (figura 09) são diferentes das barragens de terra homogêneas, podendo ser formadas pelo mesmo tipo de solo, mas sob condições geotécnicas de compactação diferentes ou por meio de mais de um tipo de material. Geralmente, essas estruturas apresentam um núcleo central constituído de um material menos permeável.

Em relação às barragens homogêneas, as barragens zoneadas são construções de maior investimento. Apesar disso, esse tipo de barragem segundo FAO (2011), por apresentar-se como um empreendimento de maior porte, permite a utilização de ferramentas de construção capazes de realizar as etapas de compactação de forma a reduzir possíveis riscos de infiltração do barramento.

Figura 09. Principais elementos de uma barragem de terra zonada.



Fonte: Carvalho, 2011.

5.3 MODELOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS

Os métodos usualmente empregados na construção de barragens fazem referência a técnica e a direção de alteamento empregado, seguindo em direção Montante, Jusante ou acompanhando uma Linha de Centro. Essa técnica é dada em função da posição e direção de execução do alteamento podendo ser realizado com o material proveniente da mesma área ou a partir de áreas de empréstimo.

5.3.1 Método da jusante

O método à jusante equivale à construção e alteamento do barramento sempre a jusante. Chammas (1989 como citado em Passos, 2009) comenta que as vantagens do método de jusante estão na sua resistência a carregamentos dinâmicos, isto se deve ao fato de escalonar a construção sem interferir na segurança, dessa forma facilita a drenagem, possui baixa susceptibilidade de liquefação e simplicidade na operação.

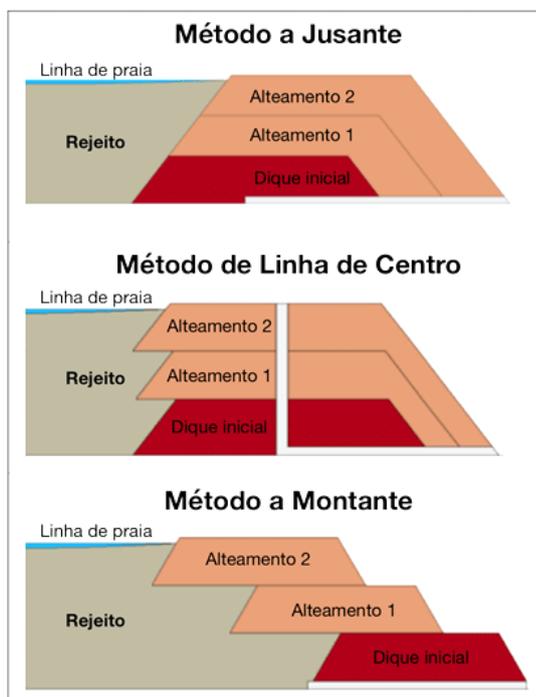
5.3.2 Método da montante

Consiste de construção e alteamento do barramento sempre à montante sobre o material já consolidado. Embora este fosse o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança (Araújo, 2006). Segundo Martin e McRobert (1999) o método de alteamento à montante representa um desafio no âmbito geotécnico devido às tensões induzidas, potencial de liquefação e não consolidação do material utilizado como fundação. No ano de 2019, após a ocorrência de acidentes envolvendo estruturas desse tipo, a ANM publicou a resolução nº 04/2019 onde é declarada a proibição de alteamentos ou construções a montante em barragens de mineração.

5.3.3 Método linha de centro

O método da linha de centro é fundamentado na construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, acompanhando um eixo vertical, chamado de linha de centro, sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento à jusante. O método da linha de centro é um método intermediário que tenta minimizar as desvantagens entre o método de montante e o de jusante (Passos, 2009). A Figura 10 apresenta um esquema dos modelos de construção de barragens citados.

Figura 10. Métodos usuais de construção de barragens.

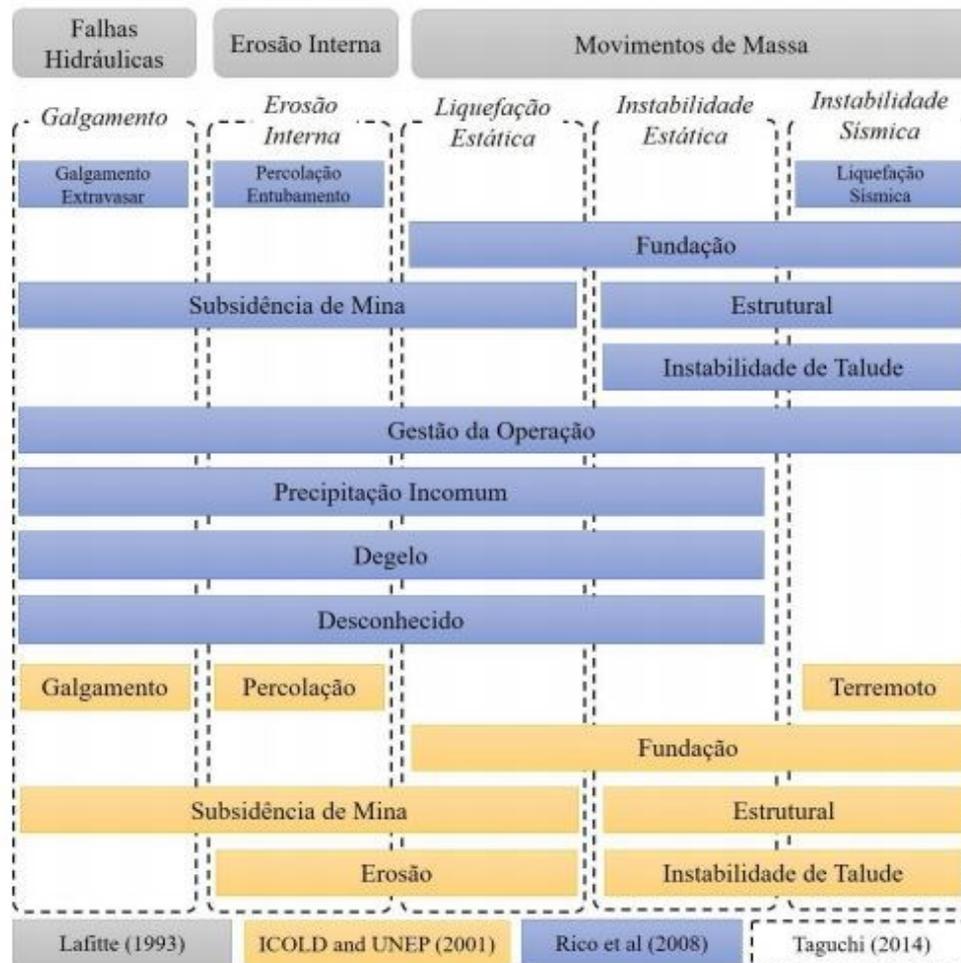


Fonte: Adaptado de Cardozo, 2020.

5.4 PRINCIPAIS MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGENS

O entendimento dos possíveis modos de falha de barragens também é essencial e sempre deve ser empregado como direcionador dos estudos, projeto, construção e operação dessas estruturas, de forma a minimizar os riscos a elas associados. Estudos de risco aplicados à segurança de barragens tendem a estabelecer três categorias de modos de falha: falhas hidráulicas, movimentos de massa e erosão interna (LAFITTE, 1993 apud PENNA et al., 2015). A Figura 11 apresenta uma compilação produzida por Taguchi (2014) dos principais tipos de falhas associadas a barragens, com base na compilação de modos de falha do ICOLD, UNEP e do US *Department of the Interior*.

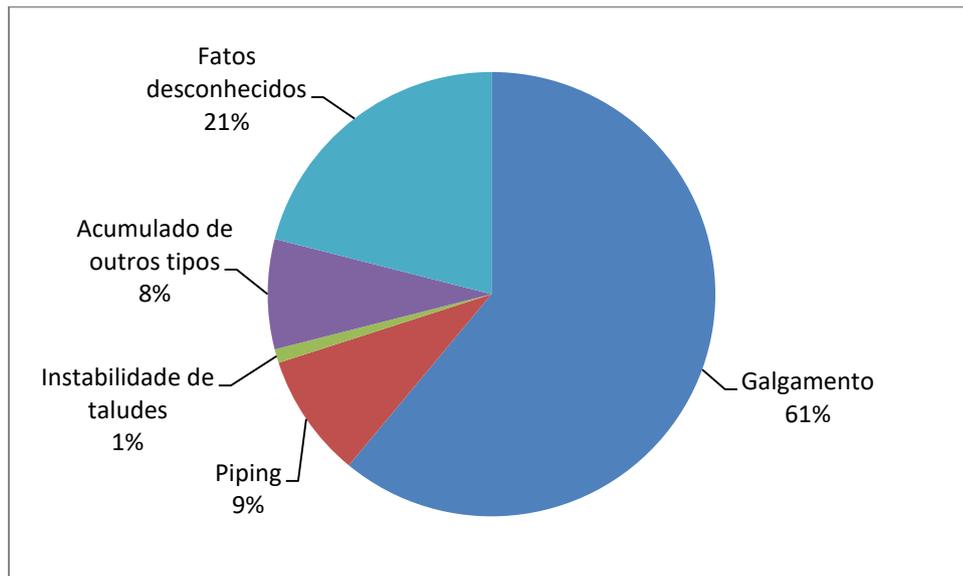
Figura 11. Compilação dos modos de falha de barragens, segundo vários autores.



Fonte: Modificado de Taguchi (2014).

De acordo com Perini (2009), entre os anos de 2000 a 2008, no Brasil, os principais casos associados a rupturas de barragens (geotécnicas e de concreto) são listados a seguir (Figura 12).

Figura 12. Dados associados às principais causas de rupturas de barragens.



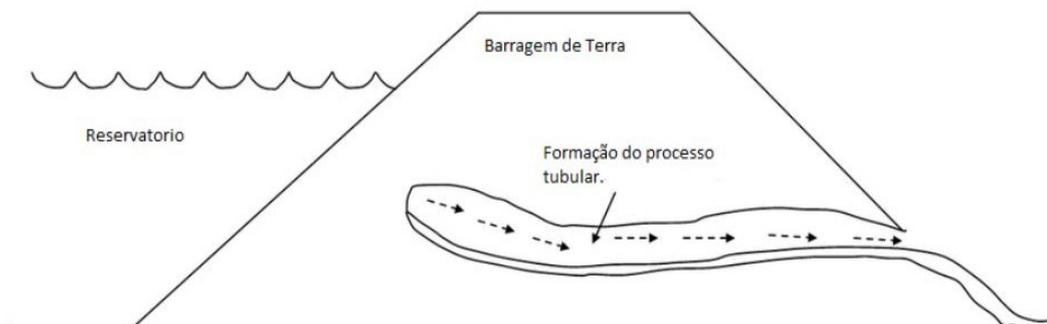
Fonte: Adaptado de Perini (2009).

5.4.1 Ruptura por *piping*

Segundo a Agência Nacional de Águas 2012, com base nos estudos de ruptura de barragem, a ruptura por *piping* produz-se por uma falha estrutural do maciço. O processo tem início, geralmente, na face a jusante do talude e progride à face de montante.

No caso de barragens de terra ou enrocamento, essa falha ocorre quando existem infiltrações através do corpo da barragem, de tal modo que se produz uma ação erosiva e o arraste dos materiais, que acabam causando uma ruptura. A ruptura também pode ser ocasionada por algum problema na compactação do maciço da barragem, criando-se um caminho para o fluxo de água através de um processo tubular (Figura 13), que acaba gerando também o arraste de partículas de solo e resultando no fenômeno de *piping* (PEREIRA, 2009).

Figura 13. Modelo esquemático do processo de piping.



Fonte: Fonte: adaptado de Goodarzi et al. (2010).

O parâmetro de plasticidade é muito determinante na formação do *piping*. A formação de processos erosivos tubulares é mais comum de ocorrer em solos com baixa coesão do que em solos coesivos ou plásticos (TONUSSI, 2017). Isso ocorre pois a ligação entre as partículas de solos argilosos funciona como uma camada impermeabilizante, evitando a formação do processo erosivo.

Para realizar o monitoramento desse fenômeno é necessário fazer o controle da percolação, pelas fundações e pelo maciço. No maciço são utilizados filtros, que podem ser verticais ou inclinados, para interceptar o fluxo de água, evitando que este progrida para o talude de jusante (TONUSSI, 2017).

5.4.2 Ruptura por *overtopping* ou galgamento

As rupturas ocasionadas por galgamento (Figura 14) ocorrem quando o vertedouro não possui capacidade suficiente, fazendo com que a água verta sobre a crista da barragem, assim, inicia-se uma erosão no talude de jusante podendo resultar na formação de uma brecha de ruptura de forma regressiva ocasionando a ruptura global do barramento. Isso pode ocorrer devido à má operação do reservatório durante uma cheia de projeto, ou em ocasiões de cheias extraordinárias para as quais o vertedouro não tenha capacidade

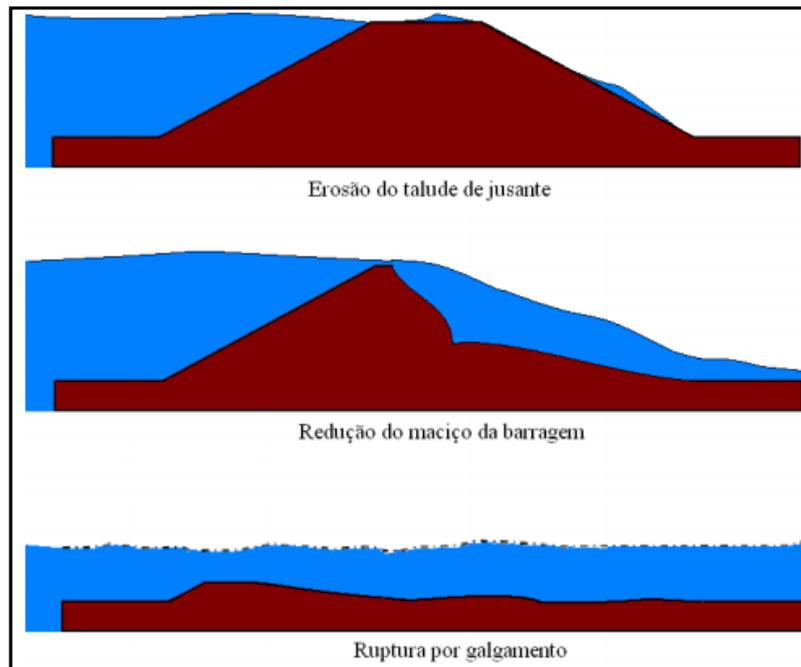
hidráulica, já que o vertedouro é dimensionado para uma cheia de projeto (PEREIRA, 2009). No caso das barragens de concreto, um galgamento não produz necessariamente uma ruptura, porém, as sobrecargas a que a barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura (ANA, 2012). No caso das barragens de terra, esse problema é particularmente perigoso devido a maior probabilidade de ocorrência de materiais soltos.

Segundo Collischonn (1997), o galgamento pode ser causado por:

- ❖ Má operação do reservatório durante a cheia;
- ❖ Ocasão de uma cheia extraordinária, para a qual o vertedouro seja incapaz de verter essa cheia afluyente;
- ❖ Formação de uma onda dentro do reservatório, de origem sísmica ou provocada pelo deslizamento de uma grande quantidade de terra de encostas.

Outra causa de uma ruptura por galgamento pode ser a ruptura a montante de outra barragem, de tal modo que a barragem de jusante é incapaz de laminar e verter todo volume advindo da barragem de montante, elevando-se o nível acima da cota da crista e provocando uma ruptura em cascata. No caso da ruptura por galgamento de uma barragem, ocasionada por chuvas intensas, as chuvas – e, conseqüentemente as vazões resultantes– podem ser muito diferentes, mas a associação de todas as vazões geradas concorre para elevar o nível acima da crista da barragem (ANA, p.15 2012).

Figura 14. Representação esquemática do processo de ruptura por galgamento.



Fonte: Pereira (2009).

5.4.3 Ruptura por liquefação

A liquefação pode ser entendida como um processo de ruptura que ocorre em solos não coesivos, saturados e em condições de carregamento não drenado. Durante a aplicação do carregamento, a poropressão aumenta até um valor igual à tensão de confinamento inicial, a tensão efetiva ou inter-granular existente no esqueleto do material é reduzida a zero e, em consequência, o material perde praticamente toda sua resistência cisalhante, comportando-se como um líquido viscoso (CASAGRANDE, 1975; CASTRO, 1969; POULOS, 1981; TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Segundo Maturano (2012), a liquefação de solos granulares é observada em depósitos de solos naturais, aterros e depósitos de rejeitos de mineração sob carregamento estático e sob carregamento dinâmico. Foi também constatada como efeito de vibrações causadas pela cravação de estacas, por

tráfego de veículos, exploração geofísica, explosões, além de vibrações sísmicas.

5.4.4 Ruptura por perda de estabilidade

Dada à existência de um talude, seja este, natural ou construído, sua tendência natural é o seu deslizamento, que por sua vez é contido se as tensões cisalhantes mobilizadas forem iguais ou menores que a resistência ao cisalhamento do material interceptado pela superfície de ruptura (REZENDE, 2003, p. 35).

Os mecanismos que contribuem para a ocorrência de movimentos de massa, majorando os esforços atuantes ou minorando as resistências dos materiais presentes no maciço do talude, são expostos por Varnes (1978) apud Gerscovich (2008).

Uma vez que os solos que estão completamente saturados não são tão coesos, uma linha freática majoritária pode reduzir a capacidade do talude de resistir a deslizamentos. Isso é muitas vezes observado por infiltrações que ocorrem na face do talude. Solos fracos ou mal compactados podem aumentar a infiltração e elevar o nível freático, bem como enfraquecer a barragem, contribuindo para um deslizamento da mesma.

Um fator chave para a estabilidade é a localização da linha freática ou da zona completamente saturada dos solos dentro do maciço. Barragens adequadamente projetadas muitas vezes incluem um sistema de drenagem interna, compostos por um filtro de areia e um dreno encoberto. Estes servem para controlar as linhas de fluxo e impedem que a percolação da água se estenda para o talude de jusante.

5.5 LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

A segurança de barragens passou a ser uma preocupação internacional a partir de 1950, com o trabalho desenvolvido pelo *International Commission on Large Dams* – ICOLD. No entanto, nos últimos anos esse tema tem ganhado

bastante visibilidade devido aos últimos acidentes com barragens ocorridos no Brasil.

Segundo Neves (2018) a legislação direcionada à segurança de barragens em território nacional, se deu a partir da publicação da Lei n.º 12.334 de 20 de setembro de 2010, a qual dá a responsabilidade pela fiscalização, bem como execuções, dessas barragens por órgãos capacitados. Essa lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinadas às acumulações de água para quaisquer usos, à disposição de rejeitos e à acumulação de resíduos provenientes da indústria. O PNSB possui alguns objetivos, dentre eles, podem-se destacar os seguintes: garantir a observância de padrões de segurança de barragens, regulamentar as ações de segurança a serem adotadas em todas as fases, promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança adotadas pelos responsáveis por barragens e a criação de condições para a ampliação do universo de controle de barragens pelo poder público.

Os responsáveis pela fiscalização das barragens no Brasil são: Agência Nacional das Águas – ANA, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Agência Nacional de Mineração – ANM, e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. A ANA é o órgão responsável por organizar, implantar e administrar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNIB, promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens, fiscalizar a segurança de barragens outorgadas pela agência, elaborar e publicar anualmente o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) (CESTARI JUNIOR, 2013). O objetivo do Relatório de Segurança de Barragens é apresentar à sociedade o panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras e a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens.

5.5.1 Dados estatísticos associados a barragens

A Lei Federal 12.334/10 institucionalizou a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A partir disso, as barragens incorporadas pela respectiva legislação são aquelas destinadas à acumulação de água para

quaisquer usos, à acumulação de resíduos industriais e à disposição final ou temporária de rejeitos e que apresentem ao menos uma das especificações a seguir, conforme artigo 1º:

I - Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

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;

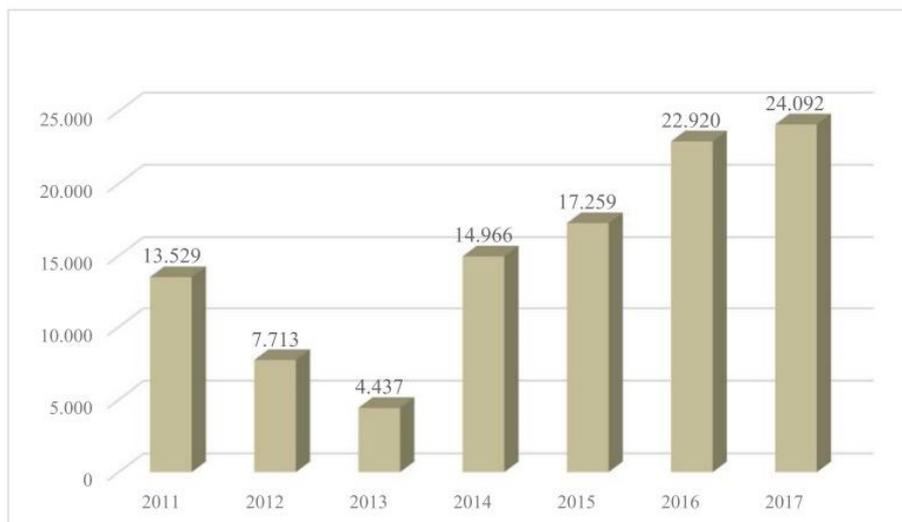
IV - Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º (BRASIL, 2010).

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens (RSB's) de 2017, publicado pela ANA estão registradas 24.092 maciços no território brasileiro. Do total cadastrado, 13.997 (ou 58%) possuem algum tipo de ato de autorização (outorga, concessão, autorização, licença, entre outros), estando, portanto, regularizadas. Este número é superior ao verificado em relação a 2016, onde 55% estavam regularizadas.

No Brasil são mais de 24 mil barragens cadastradas para inúmeros usos (ANA, 2017). Porém, nesse total, se considerarem as catalogadas e não catalogadas, pode ser superior a esse número, visto que o relatório de segurança de barragens foi implantado em 2011 pela Agência Nacional de Águas.

Ao comparar o número de barragens entre o período de 2011 a 2017 é possível observar um aumento no número total de barragens cadastradas em território nacional (Figura 15). De acordo o gráfico disponibilizado pelo RSB's, em termos absolutos, houve o acréscimo de 1.172 barragens cadastradas em relação ao ano anterior. Apesar da evolução, este acréscimo é o menor observado desde 2013.

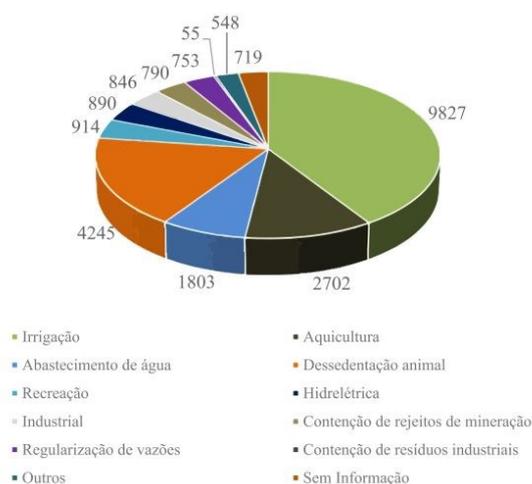
Figura 15. Evolução do cadastro de barragens.



Fonte: Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas, 2017.

Os principais usos associados a barragens são apresentados pelo RSB's no ano de 2017 (Figura 16). A maioria dos registros são associados ao uso no setor agrícola. São 9.827 casos cadastrados para fins de irrigação, 4.245 para dessedentação animal, 2.702 aquicultura e 1.803 para abastecimento de água.

Figura 16. Distribuição das barragens em relação ao uso principal.



Fonte: Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas, 2017.

5.6 GEOFÍSICA APLICADA À ANÁLISE DE BARRAGENS

A geofísica utiliza princípios físicos para estudar a Terra, por meio de investigações do meio de subsuperfície, realizando medidas que são influenciadas pela distribuição de propriedades físicas presentes no interior da Terra (KEAREY et al., 2002).

Segundo Gandolfo (2012), a utilização dos ensaios geofísicos no âmbito da geotecnia dispõe da vantagem de fornecer respostas rápidas e abrangentes do volume investigado do subsolo, em seu estado natural, sem influência de procedimentos diretos (sondagens, cavas e trincheiras). Além disso, a utilização de métodos geofísicos auxilia no fornecimento de dados acerca de sua problemática, tanto na fase de projeto, como no monitoramento da obra implantada.

Os métodos geofísicos são ótimas ferramentas no estudo de barragens, pelo fato de serem métodos não destrutivos, característica de extrema importância para os projetos de investigação de barragens, pois os métodos destrutivos podem causar danos ou agravar os eventuais problemas no corpo de um barramento.

Nos últimos anos houve um aumento na demanda do uso de técnicas geofísicas para estudar o interior de barragens, visto que facilita uma primeira identificação ou diagnóstico de fenômenos anômalos (VORONKOV et al. 2004).

5.6.1 Métodos geofísicos comuns ao estudo de barragens

Muitos autores discutem a respeito dos métodos a serem utilizados na análise de barragens. Cada método possui suas particularidades e, dependendo do tipo de barragem e dos materiais a que compõe, por exemplo, existem respostas mais significativas que darão um melhor resultado ao projeto.

Segundo Souza et al., (2006), é aconselhável que os métodos de eletrorresistividade e refração sísmica sejam utilizados num contexto de início

de projeto. Ainda nesta etapa de investigação, são incluídos os métodos de reflexão sísmica terrestre e métodos eletromagnéticos para o monitoramento de infiltrações de água. Após o processo de instalação da estrutura, o autor complementa que os métodos de eletrorresistividade, potencial espontâneo e GPR - *Ground Penetrating Radar* corroboram no monitoramento do corpo da barragem. Segundo Rinéart et al. (2012), o método de microssísmica convencional tem ganhado cada vez mais espaço nos estudos de barragens. Esse tipo de investigação permite atividades de monitoramento a longo prazo de erosões internas ou infiltrações de água.

No estudo de Coura (2019), foram investigadas duas barragens de terra no estado de São Paulo. Os métodos empregados para análise da estabilidade dos taludes foram polarização induzida e eletrorresistividade. A investigação apresentou resultados satisfatórios, sendo possível identificar as zonas de infiltração presentes na barragem. Além disso, a autora cita que o método de polarização induzida deve ser usado como um complemento ao método de eletrorresistividade e que o arranjo Dipolo-Dipolo apresentou melhor resolução quando comparado aos arranjos de Werner e Shulumberger. O arranjo Dipolo-Dipolo se sobressai em relação aos demais arranjos pois ele apresenta maiores sensibilidades a variações horizontais, possibilitando assim, melhor diferenciação das espessuras das camadas e seus contatos.

Trovó (2019) realizou um estudo em barragem de terra na cidade de Uruguaiana no estado do Rio Grande do Sul. O autor fez o uso da técnica de Eletrorresistividade para investigar o comportamento das camadas que compunham o talude. O mesmo comenta que os dados de aquisição em subsuperfície por meio da geofísica foram fundamentais para identificar zonas de menor resistividade e de possível saturação, o contexto geológico em profundidade e os limites e extensões laterais entre as camadas de solo e rocha.

No estudo de Panthulu et al. (2001), foram realizados ensaios geofísicos geoeletricos de Potencial Espontâneo (SP) e Eletrorresistividade em duas das quatro barragens de Saddle, do projeto Som-Kamla-Amba, no estado de Rajastão, na Índia, para identificação de zonas de infiltração. Os resultados da Eletrorresistividade foram satisfatórios, pois foi possível determinar anomalias

que indicam a saturação do material, sendo essas responsáveis pela infiltração nos taludes. Os resultados do método do Potencial Espontâneo (SP) foram úteis para confirmar as infiltrações nas zonas de fraqueza, delimitadas pelo estudo da Eletrorresistividade. Além disso, os dois métodos foram satisfatórios para a determinação do fluxo de infiltração.

5.6.2 Propriedades elétricas dos materiais rochosos

Uma das propriedades físicas mais variáveis em materiais geológicos é a resistividade. Muitos minerais formadores de rochas, por exemplo são isolantes e, com isso, a corrente elétrica é conduzida através das rochas, principalmente pela passagem de íons nas águas dos poros. A eletricidade é conduzida, em boa parte das rochas, em maior número através de processos eletrolíticos que por processos eletrônicos. (KEAREY et al., 2002). A resistividade dos materiais geológicos apresenta um grande intervalo de variação. Rochas ígneas, por exemplo, possuem uma tendência de apresentar altos valores de resistividade quando comparado às rochas sedimentares, essas últimas, podendo ser altamente condutivas, dependendo do conteúdo presente em seus poros. As rochas metamórficas, por sua vez, apresentam resistividades intermediárias (REYNOLDS, 1997). Apesar da porosidade ser o principal controle de resistividade das rochas, as rochas cristalinas com porosidade intergranular insignificantes são condutoras ao longo de fraturas e fissuras. Os valores de resistividade em solos superficiais variam de acordo com a variação do teor de umidade e grau de compactação de camadas mais superficiais do solo. Os valores de resistividade proposto por Reynolds (1977), variam para cada material e tipo litológico (Tabela 01), porém, é preciso lembrar que variações no grau de intemperismo e alteração da rocha, condições de metamorfismo, presença de fraturas, porosidade, entre outros, podem alterar os valores padrões.

Tabela 01. Propriedades elétricas de alguns materiais rochosos.

Tipo Litológico		Resistividade $\Omega.m$
Zona não saturada		100 a 30.000
Zona saturada (corpo do barramento)	Argiloso	20
	Argiloso-arenoso	20 a 40
	Areno-argiloso	40 a 60
	Siltito-argiloso	10 a 60
	Arenoso	60
	Argilito	10 a 20
	Arenito	80 a 200
Granito		5.000 a 1x10

Fonte: Adaptado de Reynolds, 1977.

5.6.3 Método de eletrorresistividade

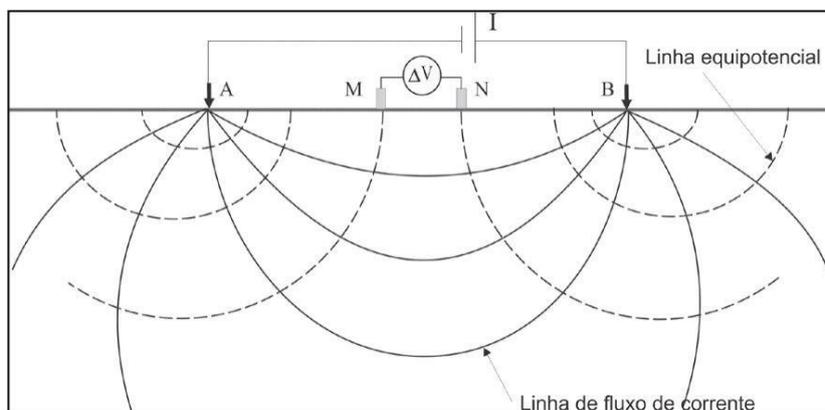
Segundo Telford et al., (1990), o método da eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico tanto dos campos elétricos naturais, existentes na crosta terrestre, como dos campos artificialmente provocados. O método é utilizado no estudo de descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala. A aplicação pode ser feita em diversos estudos como detecção de falhas e fraturas em rochas cristalinas, mapeamento de plumas de contaminação, detecção de cavidades subterrâneas, identificação de infiltrações, investigação de estruturas litológicas subterrâneas, entre outros (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

A partir de um instrumento conhecido como resistímetro, o método de eletrorresistividade gera um campo elétrico artificial de correntes alternadas. A propagação desse campo elétrico é feita a partir de um par de eletrodos de corrente A e B que é inserido no solo. Segundo Gonçalves (2016), a diferença de potencial (ΔV) que se desenvolve em resposta à aplicação desta corrente elétrica, pode ser medido por um circuito receptor, denominado por dois eletrodos (M e N), situados nos entornos (Figura 17).

Onde:

- AB = Eletrodos de corrente
- MN = Eletrodos de potencial

Figura 17. Arranjo usual para medidas de eletroressistividade.



Fonte: Modificada de Elis, 1998.

A resistividade elétrica (ρ) significa a dificuldade de passagem de corrente elétrica por um material. Para meios homogêneos e isotrópicos, o valor de resistividade obtido corresponde ao verdadeiro valor de resistividade do meio, entretanto, os materiais geológicos são, na maioria das vezes, materiais heterogêneos e anisotrópicos.

Com isso, a resistência obtida em meio geológico é conhecida como resistividade aparente (ρ_a) e representa uma média ponderada das resistividades de cada um dos materiais presentes entre as equipotenciais (ROBINSON, 1988).

A resistividade aparente (ρ_a) é representada por meio da seguinte equação:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / I$$

Onde:

ρ_a = Resistividade aparente (ohm.m)

K = fator geométrico (m)

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N

$I =$ intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA)

A fim de obterem-se diferentes respostas no modelo calculado final (resistividade aparente), diferentes maneiras de distribuições geométricas dos eletrodos “arranjos” são utilizadas nos levantamentos de campo. Esses arranjos são: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo etc.

5.6.4 Técnicas e arranjos

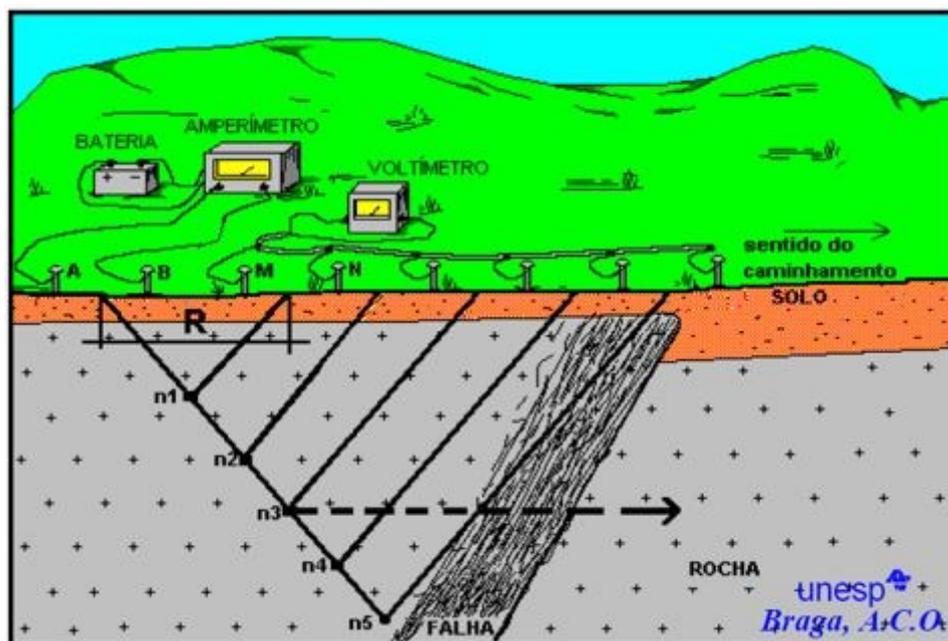
Neste tópico serão abordadas as características quanto às técnicas e aos arranjos a serem aplicados para realização desse assunto.

5.6.4.1 Caminhamento elétrico

A técnica de caminhamento elétrico, também conhecida como perfilagem elétrica, tem como objetivo gerar uma imagem da subsuperfície em que seja possível delimitar a geometria das litologias ali presentes, sendo obtida com base em medidas efetuadas ao longo do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB (GONÇALVES, 2016). Através dela, é possível investigar ao longo de linhas, as variações laterais do parâmetro físico a uma ou mais profundidades determinadas.

A realização do caminhamento elétrico exige que o espaçamento entre os eletrodos para obtenção das leituras permaneça fixo. Com isso, o arranjo será deslocado para a posição seguinte e são efetuadas as leituras de resistividade aparente correspondentes, continuando esse procedimento até o fim do perfil. O arranjo de eletrodos mais comum aplicado para essa técnica é o dipolo-dipolo. A seguir a imagem 18 apresenta um exemplo da técnica.

Figura 18. Exemplo da técnica de caminhamento elétrico.



Fonte: Braga, 2006 .

5.7.4.2 Arranjo dipolo-dipolo

Existem seis diferentes tipos principais de arranjos, a saber: Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Polo-Polo e Arranjo Gradiente. Cada arranjo de eletrodo possui uma geometria, sequência e um espaçamento particular. A escolha de qual arranjo utilizar depende de diversos fatores, como o tipo de alvo a ser mapeado (sensibilidade de cada arranjo para variações verticais e horizontais), a razão sinal/ruído e a profundidade de investigação (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007). A Tabela 02 a seguir apresenta uma breve comparação entre os arranjos comumente mais utilizados.

Tabela 02. Quadro comparativo entre alguns dos arranjos utilizados na aquisição de dados geofísicos.

Característica/Arranjo	Schlumberger	Wenner	Dipolo-dipolo
Penetração em profundidade	Média	Baixa	Alta
Sensibilidade a variações verticais (estruturas horizontais)	Média	Alta	Baixa
Sensibilidade a variações horizontais (estruturas verticais)	Média	Média	Alta
Razão sinal/ruído	Média	Alta	Baixa

Fonte: Reynolds, 1997; Lowrie, 2007.

No arranjo dipolo-dipolo, ao longo de todo levantamento geofísico o espaçamento entre os eletrodos de corrente e de potencial é mantido fixo. Cada afastamento dos pares de eletrodo representa um nível de profundidade investigado, sendo que quanto maior a distância entre os pares, mais profundo será o nível de investigação (MUSSET; KHAN, 2009).

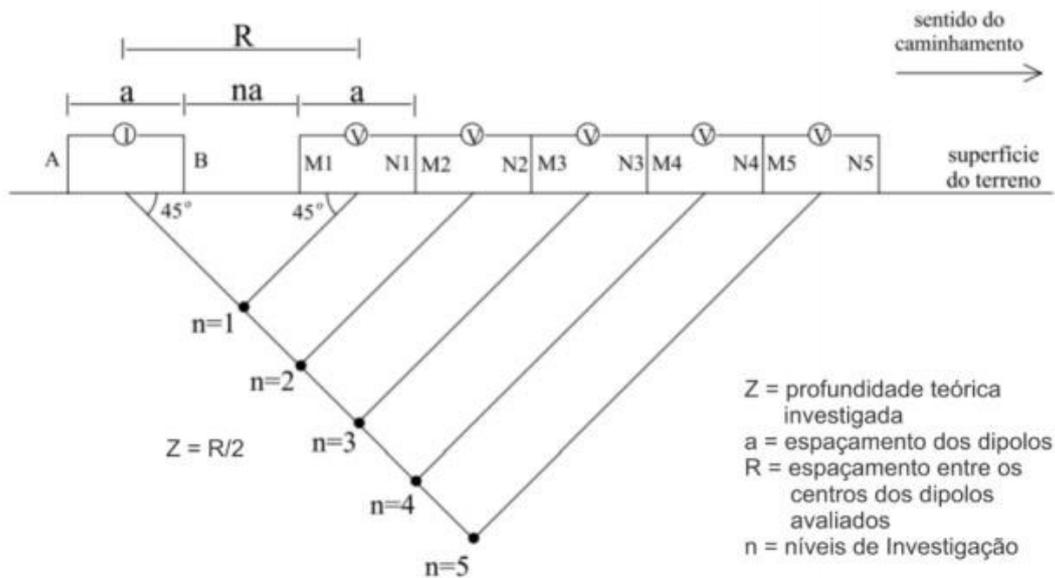
A profundidade de alcance vertical da investigação é ampliada de maneira proporcional com o aumento do espaçamento entre os eletrodos, teoricamente igual a $R/2$ (SHARMA, 2002). Além das vantagens verticais do arranjo, é possível também citar a capacidade do arranjo fornecer uma exposição horizontal longa (LOKE, 2000).

Este tipo de arranjo revela-se como um dos mais precisos e rápidos de serem executados no campo. Uma de suas grandes vantagens reside no fato de que, o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidades, obtendo-se uma caracterização dos materiais, em subsuperfície, tanto horizontalmente como verticalmente (BRAGA, 2006).

De acordo Gallas (2000), a vantagem de se fazer o uso do arranjo dipolo-dipolo é o devido ao fato dele ser um arranjo simétrico, que facilita a interpretação de uma pseudo-seção, principalmente para se determinar com

segurança a posição de uma anomalia. A Figura 19 apresenta um esquema do arranjo dipolo-dipolo associado à técnica de caminhado elétrico.

Figura 19. Esquema de arranjo dipolo-dipolo em caminhamentos elétricos.



Fonte: Extraído e modificado de GANDOLFO & GALLAS (2007).

5.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

Neste capítulo serão abordados os ensaios geotécnicos de solos comuns à análise de barragens.

5.7.1 Caracterização do solo

A caracterização física é feita habitualmente recorrendo a ensaios de rotina simples como: análises granulométricas, determinação dos limites de consistência e do teor em água natural (nos solos finos), ensaios de compactação, determinação da massa volúmica através de amostras representativas e determinação da densidade das partículas sólidas. Este conjunto de ensaios proporcionam a obtenção de parâmetros índice que identificam não só a natureza do solo, bem

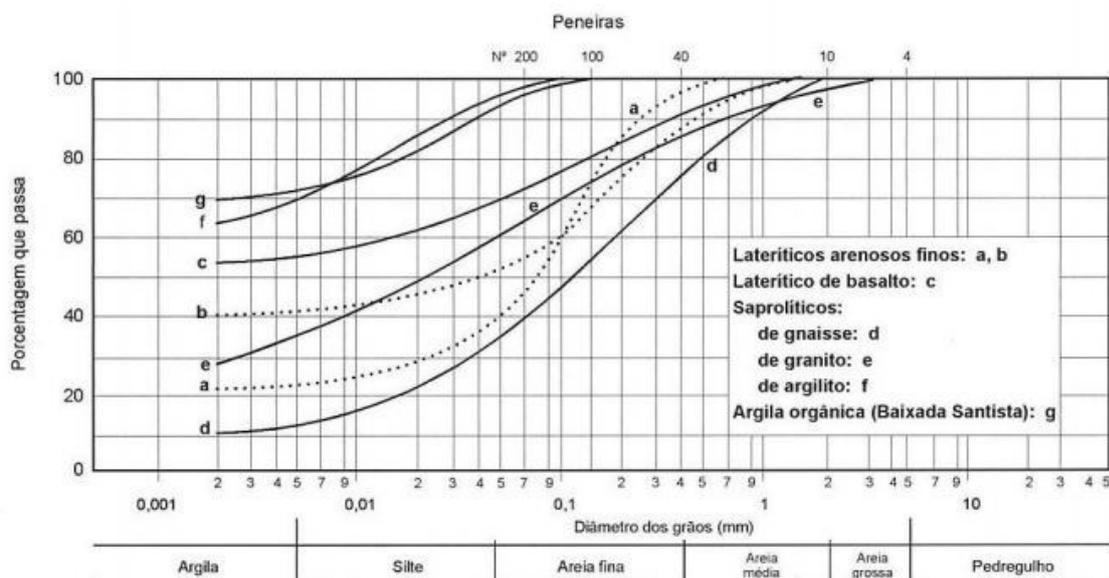
como podem ser correlacionados com as suas propriedades mecânicas. (PEIXOTO, 2019, p. 01).

5.7.1.1 Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento

De acordo DAS (2006), a análise granulométrica de um solo é realizada por meio das de ensaios que atestem as dimensões das partículas que o compõe e suas respectivas proporções. Esse ensaio avalia a distribuição dos grãos de um solo e é representada através de uma curva granulométrica.

A curva granulometria é uma representação gráfica e, através dela, é possível distinguir os diferentes tamanhos de partículas presentes no material, bem como, suas respectivas proporções, que são definidas através da determinação das porcentagens de material passante em cada peneira utilizada no ensaio. Como mencionado por Caputo (1988), através da representação gráfica, obtida por meio da curva granulometria, é possível analisar as características do solo, avaliando se ele possui granulometria contínua, descontínua, uniforme, bem graduada ou mal graduada. Além disso, considerando os limites definidos pela NBR 7181 (ABNT 1968) é possível identificar as porcentagens de pedregulho, areia, silte ou argila presentes na amostra avaliada (FERNANDES, 2016). A Figura 20 apresenta um gráfico com curvas características de alguns solos brasileiros.

Figura 20. Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.



Fonte: Pinto, 2006.

A distribuição granulométrica de solos é realizada através de dois procedimentos apresentados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984), através da NBR 7187/84. Esses dois procedimentos são: o peneiramento, que caracteriza a distribuição das partículas mais grossas e a sedimentação, para análise da distribuição das partículas finas do material. (ABNT, 1984).

O ensaio por peneiramento é adequado para análise de materiais granulares, com poucos ou sem finos. Com isso, é indicado para a avaliação da distribuição das partículas retidas na peneira nº200 (0,0075 mm) que abrange materiais como partículas de tamanho pedra, pedregulhos e areias (PINTO, 2006). Após a obtenção dos dados granulométricos do solo, é de fundamental importância realizar a classificação deste material de acordo com a dimensão das partículas. A classificação das partículas de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), determina os materiais entre: pedregulhos (2 a 60 mm), areias (0,06 a 2 mm), siltes (0,002 a 0,06 mm) e argilas (partículas menores que 0,002 mm).

Conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995) a classificação de acordo com o tamanho dos grãos tem os seguintes limites para cada tipo de solo:

- ❖ A argila é o solo de granulação fina constituída por partículas de dimensões menores que 0,002 mm.
- ❖ O silte é um solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, que exibe baixa resistência quando seco ao ar, com propriedades dominantes devido à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetro compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.
- ❖ A areia é um solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm e dividida em três tamanhos: Areia fina tem diâmetro entre 0,06 mm e 0,20 mm, a areia média entre 0,20 mm e 0,60 mm e a areia grossa entre 0,60 mm e 2,0 mm.
- ❖ Pedregulho é o material formado por minerais ou partículas de rocha com diâmetro entre 2,0 mm e 60,0 mm e dividido em três tamanhos: O pedregulho fino está compreendido entre 2,0 mm e 6,0 mm, o pedregulho médio entre 6,0 mm e 20,0 mm e o pedregulho grosso entre 20,0 mm e 60,0 mm. Para melhor visualização, a Figura 01 foi criada para ilustrar em escala logarítmica a localização das peneiras e as divisões conforme a granulometria segundo os conceitos da NBR 6502 (ABNT, 1995).

A análise granulométrica via sedimentação é realizada dentro de uma proveta com volume conhecido, contendo um agente defloculante, responsável pela desagregação de aglomerados no solo, e água destilada. Segundo Pinto (2006), considera-se que as partículas inseridas na proveta cairão com velocidades proporcionais ao quadrado de seus diâmetros. Esse ensaio é fundamentado na Lei de Stokes, onde as partículas decantam com diferentes velocidades, variando conforme o tamanho, peso, formato do grão e viscosidade da água (DAS, 2007). A Figura 21 ilustra um esquema representativo da sedimentação. O ensaio é iniciado à esquerda do frasco. No lado direito da imagem é representada a situação após se passarem certo tempo. O que ocorre é que a densidade de suspensão no início do ensaio é uniforme ao longo da altura do tubo e, à medida que o tempo passa, a densidade de suspensão torna-se diferente, pois em uma dada seção, a certa

profundidade, menos partículas estão presentes. A lei de Stokes pode ser representada pela expressão:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18x\mu} xD^2$$

Onde,

v = Velocidade de queda das partículas;

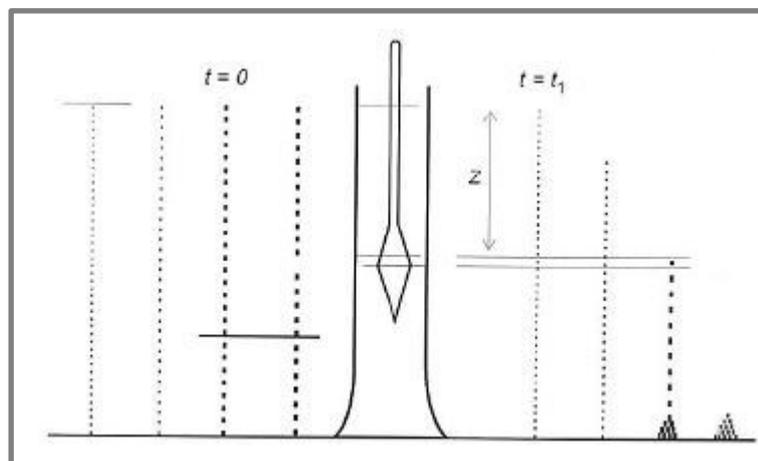
s = Peso específico do material da esfera;

γ_w = Peso específico do fluido;

μ = Viscosidade do fluido;

D = Diâmetro da esfera.

Figura 21. Esquema representativo do ensaio de granulometria de finos por sedimentação.



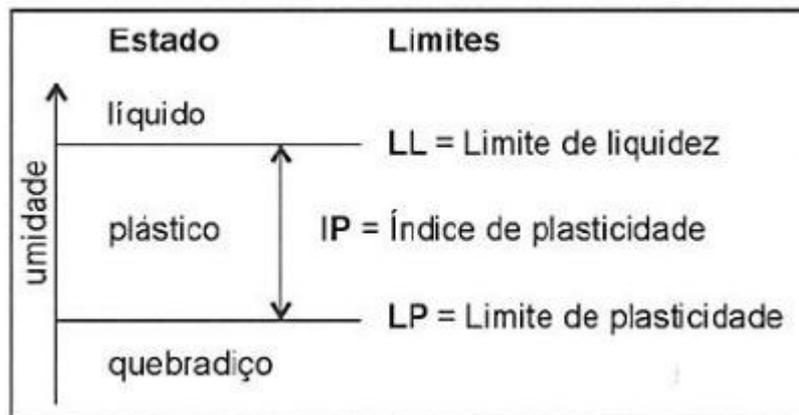
Fonte: Pinto, 2006.

5.7.1.2 Limites de Atterberg

No início do século XX, um cientista sueco chamado Atterberg desenvolveu um método para descrever a consistência de solos granulares finos com teores de umidade variados. A fração fina tem uma importância muito

grande nesse comportamento, pois quanto menores as partículas, maior a superfície específica. Para isso, o estudo do comportamento de solos finos torna necessária a determinação de seus limites de consistência. Dependendo do seu teor de umidade, de forma geral, um solo pode existir em três diferentes estados: quebradiço, plástico e líquido (Figura 22).

Figura 22. Limites de Atterberg dos solos.



Fonte: Pinto, 2006.

Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado, como se mostra na Figura acima, são definidos como: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) dos solos.

A diferença entre o Limite de liquidez e Limite de plasticidade é denominada índice de plasticidade (IP). O índice de plasticidade é o indicador do estado plástico de um solo, e é comumente utilizado por diversos autores para elaboração de correlações com o intuito de se obter parâmetros de outros ensaios, ou estimativas de comportamento durante a execução dos mesmos. Segundo Heidemann (2011), é comum a tentativa de correlacionar o limite de liquidez e o índice de plasticidade com outros parâmetros de comportamento dos solos, como a resistência ao cisalhamento. A Tabela 03 a seguir, apresenta uma relação com os principais índices de Atterberg em alguns solos no Brasil.

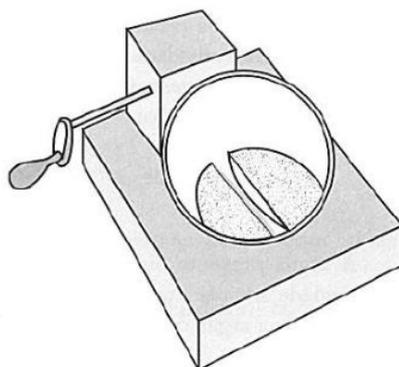
Tabela 03. Índices de Atterberg em alguns solos brasileiros.

Solos	LL%	IP%
Residuais de arenito (arenosos finos)	29-44	11-20
Residual de gnaiss	45-55	20-25
Residual de basalto	45-70	20-30
Residual de granito	45-55	14-18
Argilas orgânicas de várzeas quaternárias	70	30
Argilas orgânicas de baixadas litorâneas	120	80
Argila porosa vermelha de São Paulo	65-85	25-40
Argilas variegadas de São Paulo	40-80	15-45
Areias argilosas variegadas de São Paulo	20-40	5 a 15
Argilas duras, cinzas, de São Paulo	64	42

Fonte: Pinto, 2006.

Por definição, o limite de Liquidez pode ser entendido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar numa concha (PINTO, 2006). São realizadas várias tentativas com o solo em diferentes umidades, sendo o objetivo do ensaio obter o número de golpes necessário para que a ranhura criada na concha seja fechada. A execução do ensaio é padronizada em território nacional pela ABNT NBR 6459 (ABNT, 2016). A Figura 23 a seguir exemplifica um modelo do equipamento de Casagrande utilizado na determinação do limite de liquidez.

Figura 23. Esquema do aparelho de Casa Grande usado na determinação do limite de Liquidez.



Fonte: Pinto, 2006.

O limite de plasticidade é realizado conforme as normas NBR 7180 (ABNT, 2016). Trata-se do menor teor de umidade na qual, se consegue moldar um cilindro de 3mm de diâmetro e cerca de 10cm de comprimento, rolando-se o material com a palma da mão sobre uma placa de vidro (PINTO, 2006). É geralmente associado aos solos argilosos, pois quanto maior seu valor, mais plástico será considerado o solo. Nesse sentido, em areais limpas, o índice de plasticidade é nulo, sendo então, o material classificado como não plástico (IP=NP) (CAPUTO, 1988). Caso os solos granulares apresentem uma quantidade representativa de partículas finas, estas deverão ter seus valores de LL, LP e IP definidos, pois as mesmas afetam o comportamento do material. Na Tabela 04 a seguir são apresentados os valores de IP e suas respectivas classificações quanto a sua plasticidade.

Tabela 04. Classificação dos solos em relação aos valores de IP.

IP	Descrição
0	Não plástico
01 a 05	Ligeiramente plástico
05 a 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: Pinto, 2006.

5.7.1.3 Ensaio de peso específico

Segundo Das (2007) “[...] O peso específico relativo é definido como a relação entre o peso específico de um dado material e o peso específico da água” (p. 21). O peso específico dos grãos ou densidade real dos grãos é um número adimensional, que é utilizado na classificação dos solos. O valor da densidade real dos grãos varia de acordo com os minerais constituintes e com a porcentagem deles presentes no solo (DAS, 2007).

A execução do ensaio de peso específico pode ser baseada na norma da ABNT NBR 6508/17 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm –

Determinação da massa específica como também na norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) – ME 093/94 – Densidade real dos solos. As normas citadas podem ser diferenciadas por três principais critérios: quantia de material utilizada, metodologia de retirada do ar da amostra e tamanho do picnômetro empregado na realização do ensaio.

Nos critérios técnicos da ABNT recomenda-se a utilização de um picnômetro de capacidade de 500 cm³ e uma quantidade aproximada de 50 a 60 g, dependendo do tipo de solo. Seguindo a norma da DNER é recomendada a utilização de um picnômetro de 50 cm³ com uma quantidade aproximada de 10 g de solo. A retirada de ar da amostra pela norma da ABNT é realizada por meio de vácuo e, na norma do DNER através do aquecimento do picnômetro.

Para obtenção do peso específico real dos grãos é necessário se conhecer o volume do picnômetro e o peso dele preenchido com água, de forma a garantir que os vazios estejam totalmente preenchidos, com ausência de ar. Nesse sentido, segundo o DAS (2007), o valor correspondente a variação de volume de água com e sem o solo dentro do picnômetro, corresponderá ao volume do solo acrescentado. Realizando-se a divisão entre o peso do solo seco pelo seu volume será possível se obter o peso específico real somente dos grãos do solo.

Como o peso específico do solo é calculado levando em conta a temperatura da água durante o ensaio, é necessário que se faça uma correção a fim de se obter resultados padronizados. O valor da densidade real deverá ser referido à temperatura de 20°C, sendo, então, chamada de δ_{20} . Para a obtenção deste valor deve-se determinar a razão entre a densidade relativa da água a temperatura t e a densidade relativa da água a 20°C. A Tabela 05 mostra a variação da massa específica da água (δt), em g/cm³, entre 1°C e 40°C

Tabela 05. Massa específica da água em função da temperatura, em g/cm³.

Temperatura °C	Massa específica da água (g/cm ³)	Temperatura (°C)	Massa específica da água (g/cm ³)
1	0,9999	21	0,998
2	1	22	0,9978
3	1	23	0,9976
4	1	24	0,9973
5	1	25	0,9971
6	1	26	0,9968
7	0,9999	27	0,9965
8	0,9999	28	0,9963
9	0,9998	29	0,996
10	0,9997	30	0,9957
11	0,9996	31	0,9954
12	0,9995	32	0,9951
13	0,9994	33	0,9947
14	0,9993	34	0,9944
15	0,9991	35	0,9941
16	0,9999	36	0,9937
17	0,9988	37	0,9934
18	0,9986	38	0,9933
19	0,9984	39	0,9926
20	0,9982	40	0,9922

Fonte: ABNT NBR 6508:2017.

Para o cálculo da massa específica dos grãos é utilizada a equação a seguir, onde, para que se tenham resultados satisfatórios, os valores não podem diferir entre si em mais de 0,02 (NBR 6508:2017) e 0,009 (DNER – ME 093/94) e se tenha a média de pelo menos dois ensaios.

$$\delta = \frac{M1 \frac{100}{(100 + h)}}{\left[M1 \frac{100}{(100 + H)} \right] + M3 - M2} \delta T$$

Onde:

δ é a massa específica dos grãos do solo;

M é a massa do solo úmido;

M_2 é a massa do picnômetro + solo + água, na temperatura T de ensaio;

M_3 é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, na temperatura T de ensaio;

h é a umidade inicial da amostra e,

δT é a massa específica da água, na temperatura T de ensaio, da Tabela 5.

Geralmente o peso específico dos solos está entre 2,6 e 2,9 e, quando um material apresenta quartzo em sua composição, geralmente, fica em torno de 2,65. A Tabela 06 demonstra os valores típicos de densidade real dos grãos para diferentes tipos de minerais presentes nos solos (DAS, 2007).

Tabela 06. Valores típicos de densidade real dos grãos.

Mineral	Peso específico (G)
Quartzo	2,65
Caulinita	2,6
Ilita	2,8
Montmorilonita	2,65 - 2,8
Haloisita	2,0 - 2,55
Feldspato potássico	2,57
Feldspatos sódico e cálcico	2,62 - 2,76
Clorita	2,6 - 2,9
Biotita	2,8 - 3,2
Muscovita	2,76 - 3,1
Hornblenda	3,0 - 3,47
Limonita	3,6 - 4,0
Olivina	3,27 - 3,7

Fonte: Das (2007, p. 21).

5.7.2 Resistência ao cisalhamento do solo

De acordo Lambe e Whitman (1951), a resistência ao cisalhamento de um determinado solo pode ser entendida como a tensão máxima de

cisalhamento que um solo pode resistir antes do momento de ruptura ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que estiver ocorrendo à ruptura.

A resistência ao cisalhamento de solos é normalmente dada pelo Critério de Mohr Coulomb de acordo com a equação 6. A envoltória de ruptura em alguns casos pode exibir uma pequena curvatura, mas a maioria dos estudos faz uma aproximação para uma reta.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento

c = intercepto de coesão ou coesão aparente

σ = tensão normal no plano de ruptura

ϕ = ângulo de atrito interno

O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre corpos sólidos ou partículas de solo. Os parâmetros de coesão aparente e ângulo de atrito interno do solo são as variáveis que condicionam a ocorrência do cisalhamento dos solos. Esses parâmetros são obtidos por meio de retroanálise de escorregamentos, ensaios de campo e laboratoriais e através dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais.

Muitos fatores influenciam no valor de resistência de cisalhamento de um solo (THERMANN et al, 2006). Esses parâmetros podem ser relacionados às propriedades do solo como características de tamanho e distribuição do grão, conteúdo de água etc. As técnicas adotadas na realização do ensaio, tais como, velocidade de deslocamento e tamanho de cisalhamento também pode influenciar no resultado. Outro fator que pode influenciar a resistência ao cisalhamento do solo é a presença da vegetação. As raízes da vegetação atuam como fibras que aumentam a resistência ao cisalhamento do solo.

A resistência ao cisalhamento do solo pode também ser usada como um indicador de compactação do solo (AYERS e PERUMPRAL, 1982; SCHJONNING, 1991). Em geral, segundo Azevedo (1999), os solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento mediante a menor

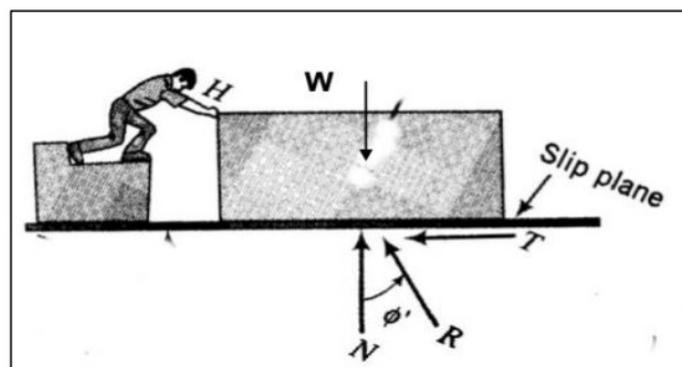
distância entre as partículas, o que lhes confere conseqüentemente, menor índice de vazios (ROCHA et al. 2002).

Como mencionado por Gerscovich (2012, p. 21) “A ruptura em si é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo”. Nessa zona, quando o processo de deslizamento inicia, não suporta as tensões aplicadas ao solo e não consegue interromper a ruptura. Desse modo, é gerada uma superfície de cisalhamento. Assim sendo, entende-se que este processo ocorre quando as tensões cisalhantes forem maiores que a resistência ao cisalhamento do solo.

5.7.2.1 Ângulo de atrito

O ângulo de atrito é a resistência obtida pelo contato entre as partículas, definida como a força tangencial necessária para deslizar um plano sobre o outro. O ângulo de atrito é o maior obtido entre a força normal e as resultantes das forças tangencial e normal sem que haja deslizamento. A Figura 24 mostra o exemplo onde o peso do corpo gera uma carga sobre o plano e para seu deslocamento, é necessário que haja uma força proporcional ao coeficiente de atrito entre os materiais e a carga normal (PINTO, 2006).

Figura 24. Representação esquemática da resistência de materiais.



Fonte: Gerscovich (2010).

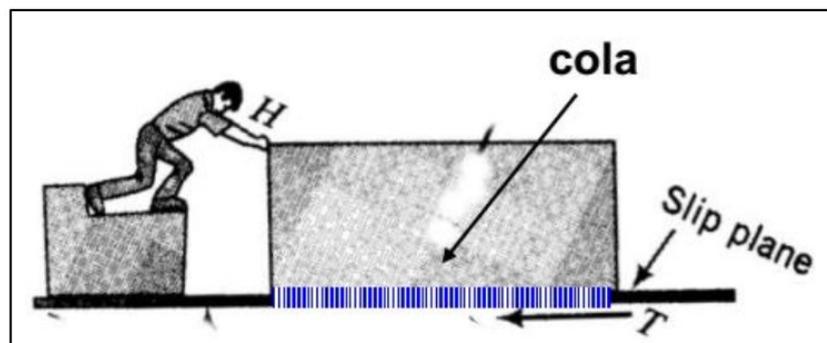
O ângulo de atrito entre os grãos de areia e argila são diferentes devido as forças transmitidas. Na areia, a força de contato é superior e permite o

contato direto entre os grãos, eliminando a água nos vazios. Nas argilas, a força de contato é inferior e insuficiente para expulsar a água adsorvida pelos grãos, tornando a água uma transmissora de força. (LAMBE E WHITMAN, 1979; CAPUTO, 2011; CRAIG, 2011).

5.7.2.2 Coesão

Segundo Gerscovich (2012), o mecanismo de coesão ocorre devido a uma ligação efetiva entre os grãos do solo, semelhante a uma cola, tornando o esforço necessário para o deslizamento maior, não sendo dependente da tensão normal (Figura 25). A coesão verdadeira só é encontrada em solos argilosos ou cimentados.

Figura 25. Esquema representativo da coesão entre partículas.

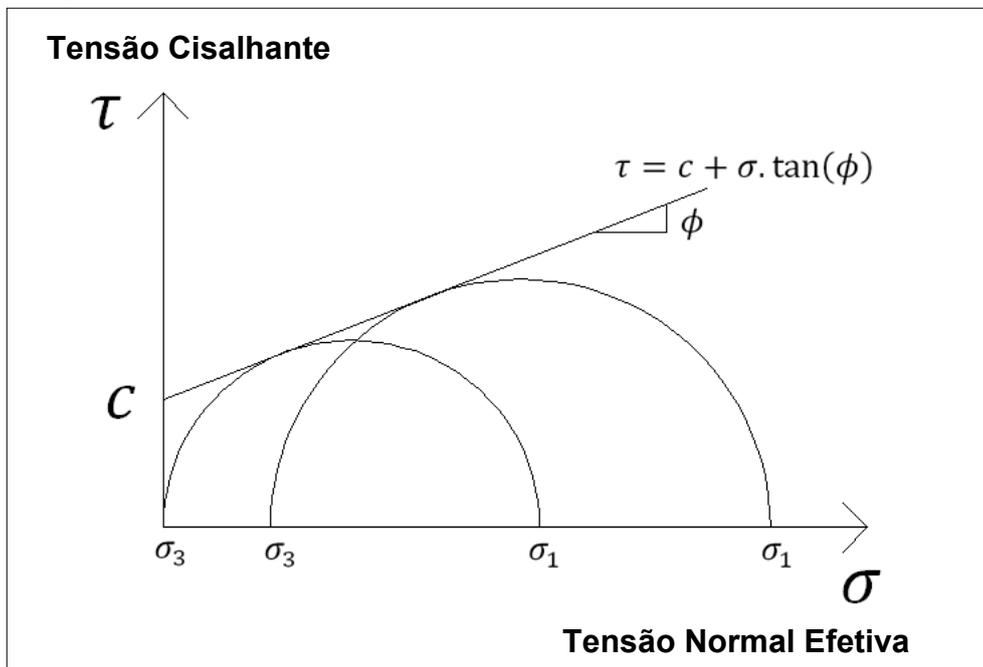


Fonte: Gerscovich, (2010).

Os dois parâmetros de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito e coesão, podem ser obtidos através do círculo de Mohr-Coulomb. É um círculo gerado pelas tensões cisalhantes em função dos carregamentos normais e tangenciado por uma reta (envoltória de ruptura) em seus pontos máximos, onde a ruptura só acontecerá quando a tensão cisalhante ultrapassar o círculo. No ponto onde a reta interceptar o eixo da tensão cisalhante, tem-se o valor da coesão e o ângulo formado entre a tangente deste círculo e seu eixo das

tensões é o valor do ângulo de atrito, como na Figura 26. (CRAIG, 2011; CAPUTO, 2011; PINTO, 2006).

Figura 26. Envoltória do círculo de Mohr.



Fonte: Adaptado de Pinto, 2006.

Onde:

c = corresponde ao intercepto coesivo;

ϕ = é o ângulo de atrito; e

σ = são as tensões normais efetivas mínimas e máximas.

5.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Conforme (ABGE, 1998), a análise de estabilidade de taludes abrange uma série de procedimentos visando à determinação de um índice ou de uma grandeza que permita estimar o quão próximo de uma ruptura um dado talude se encontra. Diversos autores apresentam métodos de análise de taludes entre eles: TERZAGHI e PECK (1962), MORGENSTERN e SANGREY (1978), HOEK e BRAY (1981), GUIDICINI e NIEBLE (1984), e GIANI (1992). Sendo esses métodos, determinados a partir de parâmetros de natureza do terreno, poro-pressão, sobrecargas, geometria, etc.

Fiori e Carmignani (2009) mencionam que o talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força: o peso dos materiais, o escoamento da água e a resistência ao cisalhamento. Para análise de estabilidade, deve-se levar em conta o equilíbrio entre essas forças. A massa de solo tende a se movimentar para baixo a partir da soma das forças de peso dos materiais e de escoamento da água. Já a força de resistência ao cisalhamento é contrária a essas outras duas, sendo então responsável pelo comportamento estático do talude.

5.8.1 Métodos de análise de estabilidade

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

- ❖ **Análise determinística:** Pode ser subdividida em tensão deformação 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.

5.8.2 Fator de segurança

A determinação da estabilidade do talude é baseada no cálculo de fator de segurança. O fator de segurança, por sua vez, pode ser definido como a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo, em termos de tensões efetivas, e a resistência mobilizada ou tensão cisalhante atuante, sendo esta última obtida através das reações de equilíbrio (DAS, 2007). O fator de segurança, normalmente é conhecido como FS e pode ser definido conforme mostra a equação abaixo.

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

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

Segundo dados de Marangon (2009) o fator de segurança pode variar ao longo do tempo, tendo em vista que um talude pode passar anos sem sofrer deslizamento e em um dado momento ou situação ter suas condições de estabilidade alteradas. Do ponto de vista conceitual, as barragens, em geral, sejam de acumulação de água ou de mineração, são definidas na Lei 12334/2012. A conceituação mais restrita destas estruturas se encontra na NBR 13208 (2017). Essa NBR especifica os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos

de beneficiamento, contenção de sedimentos e reservação de água em mineração, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente

A avaliação da segurança do talude de jusante baseou-se na análise de estabilidade conforme critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 13028/2017, que estabelece para uma ruptura do talude de jusante, em condições freáticas normais, um coeficiente de segurança mínimo no valor de 1,50.

Tabela 07. Valor mínimo de fator de segurança conforme a NBR 13028/2017.

VALOR MÍNIMO DE FATOR DE SEGURANÇA, (NBR 13028/2017)	
Coeficiente de segurança mínimo	1,5

Fonte: Adaptado de NBR 13028.

5.8.3 Métodos de equilíbrio limite e cálculo do fator de segurança

Os Métodos de Equilíbrio Limite fornecem o fator de segurança do talude através das propriedades de resistência ao cisalhamento e das descontinuidades, a pressão de poro e outras propriedades do maciço. Em geral, os métodos de equilíbrio limite tem em comum a comparação de forças sob uma determinada superfície.

Segundo Massad (2010), o método de equilíbrio limite leva em consideração os seguintes fatores:

- ❖ O solo se comporta como material rígido plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem que haja deformação;
- ❖ São consideradas equações de equilíbrio estático até a iminência da ruptura, quando na realidade o processo é dinâmico;
- ❖ O fator de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Apesar de ser um método rápido e mais simples em relação a outros métodos disponíveis para análise estabilidade de taludes, algumas limitações podem ser associados a esse tipo de método:

- ❖ Em casos complexos como em situações de deslocamentos, o modelo de falha torna-se pouco adequado;
- ❖ Por se tratar de um método de análise estático, as deformações e a atribuição das deformações não são consideradas;
- ❖ A atribuição de tensões uniformemente distribuídas pode não representar a forma da superfície corretamente.

Muitos são os métodos para determinação do fator de segurança de uma dada superfície. Calle (2000) comenta que a escolha do modo de ruptura provável deve-se fundamentar no conhecimento geológico *in situ* e do perfil de solo intemperizado.

Comumente são utilizadas superfícies circulares para facilitar a solução dos casos. Dentre os métodos para o cálculo do fator de segurança de uma superfície destacam-se: Fellenius (1936), Bishop Simplificado (1955), Janbu Simplificado (1973), Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967).

Calle (2000) cita algumas considerações a respeito dos principais métodos usados:

- ❖ Método de Fellenius - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em fatias e não considera forças entre elas, mas considera haver tensão normal ao peso na base das fatias;
- ❖ Método de Bishop Simplificado - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas, considera a resultante das forças interlamelares horizontal e as forças cisalhantes entre lamelas como nulas e
- ❖ Método de Janbu Simplificado - considera uma superfície de ruptura qualquer e a resultante das forças interlamelares é determinada por uma linha de empuxo assumida.

6. METODOLOGIA

Embora a barragem seja composta por duas ombreiras, o alvo desse trabalho é focado na ombreira a sudoeste do vertedouro da barragem, como indicado pela Figura 27 a seguir. Todas as etapas de investigação foram realizadas com o reservatório cheio.

Figura 27. Região alvo do estudo.



Fonte: Autora, 2021.

A metodologia foi baseada em cinco etapas, sendo:

(a) Etapa de escritório: nessa etapa foram feitos levantamentos de bibliografias disponíveis que pudessem contribuir para o estudo como teses, doutorados, livros, monografias, mapas e afins;

(b) Etapa de campo: consistiu na realização de visitas de reconhecimento da área de estudo, de coleta de amostras indeformadas e

deformadas para realização dos ensaios em laboratório e execução de ensaios de campo;

(c) Etapa de laboratório: compreendeu o desenvolvimento dos ensaios de caracterização dos solos;

(d) Etapa de processamento: abrangeu a organização e tratamento dos dados obtidos através dos ensaios de laboratório, ensaios de campo e dos resultados originados através da modelagem;

(e) Etapa de análise e discussão dos dados obtidos a partir dos ensaios de solos, da investigação geofísica e da modelagem numérica.

Os equipamentos e materiais utilizados para realização das etapas mencionadas foram disponibilizados pela Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA e pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

6.1 VISITA DE RECONHECIMENTO DA ÁREA DE ESTUDO

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

6.2 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

O levantamento geofísico de campo foi realizado através do método geoeletrico de eletrorresistividade. O equipamento utilizado foi o SYSCAL multicanal do fabricante Iris *Instruments*.

Foram elaborados dois perfis paralelos longitudinais à direção do eixo principal da barragem. O primeiro perfil (Perfil 1) está situado na crista da barragem e o segundo perfil (Perfil 2) no talude a jusante da barragem indicados na Figura 28. O levantamento teve duração aproximada de 2h30. Utilizou-se a técnica de caminhamento elétrico, o arranjo dipolo-dipolo e o espaçamento entre os eletrodos de 3 metros. O processamento dos dados foi

feito no software Res2Dinv (versão estudante). A Figura 29. (A), (B), (C) e (D) apresentam alguns registros do dia do campo

Figura 28. Localização dos perfis de levantamento geofísico da barragem.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 29. (A) Montagem dos equipamentos em campo (B) Visualização geral do levantamento geofísico (C) Conexão do eletrodo, bobina e jacarés; (D) Equipamento SYSCAL utilizado.



Fonte: Autora, 2021.

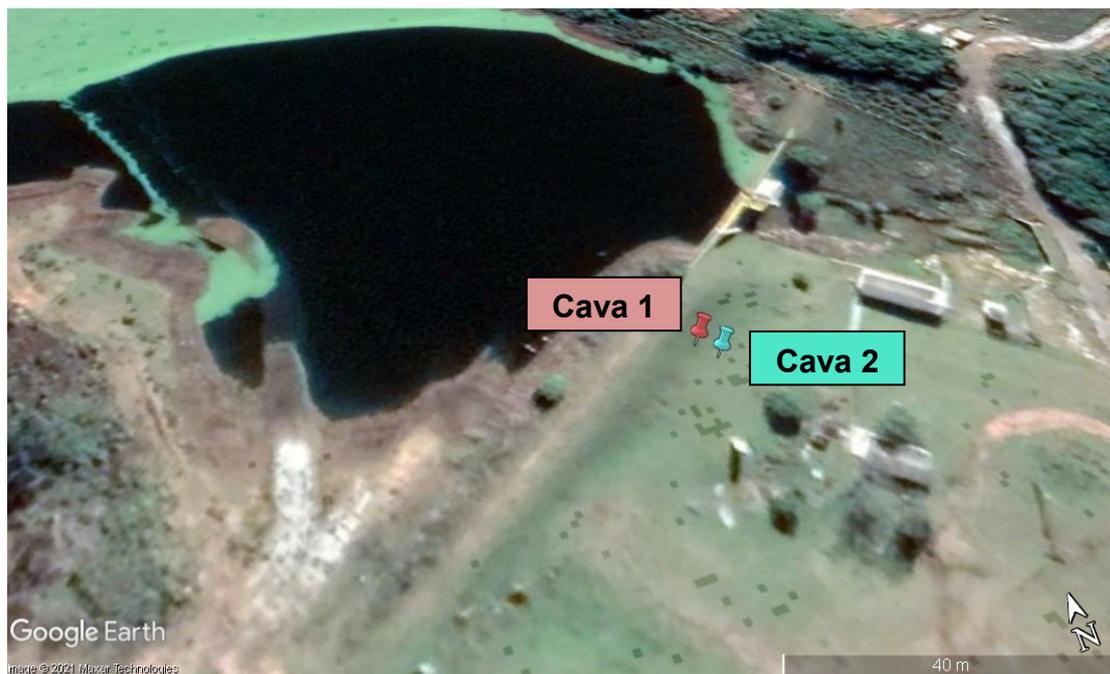
6.3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA DOS SOLOS

Com o intuito de realizar a caracterização física e mecânica dos solos foram realizados alguns ensaios descritos a seguir. A coleta do material para realização dos ensaios seguiu as normas e exigências técnicas brasileiras de cada ensaio executado.

6.3.1 Coleta de amostras em campo

As amostras foram coletadas na barragem no dia 20 de maio de 2021 com o auxílio de uma máquina retroescavadeira (Figura 31.A) e de uma equipe de campo (Figura 31.B). Foram realizadas duas cavas (Cava 1 e Cava 2). Com base na distribuição das anomalias de resistividade, optou-se por realizar uma cava na porção central do talude (Cava 1) e outra cava na região do pé do talude (Cava 2). Além da análise da resposta geofísica, a escolha também levou em consideração uma distância 50cm abaixo da base do horizonte orgânico de solo para que não houvesse interferência dessa camada. As coordenadas de localização das cavas 1 e 2 são apresentadas na Tabela 08 e os pontos de coleta são apresentados na Figura 30.

Figura 30. Localização dos pontos de coleta das amostras de solo.



Fonte: Autora, 2021.

Tabela 08. Coordenadas de localização dos locais de coleta das amostras.

Local	Coordenadas UTM
Cava 1	0261936 mE / 6618424 mS
Cava 2	0261934 mE / 6618428 mS

Fonte: Autora, 2021.

Para realização do ensaio de cisalhamento direto foram coletadas amostras indeformadas a fim das mesmas sofrerem as menores alterações possíveis, mantendo-se, portanto, as condições naturais de campo. As amostras indeformadas foram coletadas através da cravação de anéis de cisalhamento de dimensões 5x5cm (FIGURA 31.C). Após a moldagem dos anéis, eles foram embalados individualmente em papel filme, identificados e armazenados (FIGURA 31.D) em uma caixa de isopor forrada com plástico bolha a fim de evitar perdas de umidade e amalgamento do material. Após a coleta do material, as cavas foram recobertas (Figura 31.E).

Para os demais ensaios, fez-se a coleta de material deformado. As amostras deformadas foram coletadas com auxílio de uma pá, armazenadas em sacos plásticos, identificadas e lacradas com fitas adesivas.

Figura 31. (A) cavas realizadas a jusante do talude; (B) equipe de apoio de campo; (C) material cravado no anel de cisalhamento; (D) armazenamento e identificação das amostras; (E) cavas recobertas com o mesmo material.



Fonte: Autora, 2021.

6.3.2 Ensaio executados em laboratório

A realização dos ensaios de caracterização física dos solos e de cisalhamento direto foi feita em parceria com o Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Todos os ensaios foram executados para os materiais coletados das cavas 1 e 2.

6.3.2.1 Análise granulométrica por sedimentação e peneiramento

As análises granulométricas foram realizadas de acordo a NBR 7181 (ABNT, 1984) que consiste em duas etapas: sedimentação e peneiramento. O ensaio de sedimentação foi utilizado para determinar a distribuição granulométrica da fração fina do solo, através da velocidade de queda das partículas sólidas no meio líquido, tomando como base a lei de Stokes. A porção do solo superior a 0,075 mm de diâmetro foi analisada por meio de peneiramento, enquanto que a parcela com diâmetro mínimo equivalente e/ou inferior a 0,075 mm foi ensaiada pelo processo de sedimentação.

Para ambas as análises, o material coletado foi inserido em diferentes recipientes e acondicionado na estufa a 25°C para secagem por 72 horas. Após esse processo, o material foi alocado em um almofariz e destorroado com o auxílio de uma mão de gral (Figura 32.A). Em seguida, o material foi passado em uma peneira de 2mm e recolheu-se o material passada para execução dos ensaios (Figura 32.B).

Para realização do ensaio de sedimentação foram pesados e armazenados em um copo béquer, de peso conhecido, cerca de 100g de material de cada cava e, em seguida, foi adicionado 125ml de defloculante hexametáfostato. Acondicionados no copo béquer, o material permaneceu em repouso durante 24 horas (Figura 32.C). Após esse período, o material foi transferido para o aparelho de dispersão (Figura 32.D) e, com o auxílio de água destilada, foi removido todo o material decantado no fundo do copo béquer. Com todo conteúdo no copo, o aparelho dispersor foi ligado por 15 minutos. Após ação do dispersor, o material foi acondicionado em uma proveta de vidro

(Figura 32.E) e com auxílio de água a mesma foi preenchida até completar 1 litro. A boca da proveta foi vedada com uma luva de borracha e o conteúdo foi agitado manualmente durante 3 minutos. Finalizado o processo de agitação, a proveta foi inserida sobre uma bancada e em seguida foi anotado o horário do início da sedimentação e as medidas apresentadas em determinados tempos com o auxílio de um bulbo que foi inserido dentro da proveta. Foram registradas leituras em 0,5; 1; 2; 4; 8; 15 e 30 minutos, 1; 2; 4; 8 e 24 horas.

Após a última leitura, em uma pia, todo material acondicionado dentro da proveta foi transferido para uma peneira nº200 (0,075mm) e com o auxílio do jato de água de uma mangueira foi removido o conteúdo retido na parede da proveta. O material então retido na mencionada peneira foi colocado em uma placa de petri (Figura 32.F) e levado para a estufa em temperatura de 50°C durante 24 horas. Após a secagem do material, o mesmo foi inserido nas peneiras de 1,2, 0,6 0,42, 0,25 e 0,075mm e o conteúdo retido em cada uma delas foi anotado.

Figura 32. (A) Amostra sendo destorroada; (B) Material passante na peneira de 2mm; (C) Amostra em repouso com defloculante; (D) Instrumento difusor; (E) Material em proveta de vidro; (F) Material fino em placa petri.



Fonte: Autora, 2021.

6.3.2.2 Limites de Atterberg

De acordo com as normas ABNT NBR 6459/84 e NBR 7180/84, foram realizados os ensaios dos limites de Atterberg: limite de liquidez e limite de plasticidade. Ambos os ensaios são realizados com conteúdo passante na peneira 40 (0,42mm).

O ensaio de limite de plasticidade foi executado com base na ABNT NBR 7180 (1984). O ensaio foi realizado acrescentando-se água destilada no solo até que fosse obtida uma pasta homogênea. Com base no molde de metal de dimensões 3mm de diâmetro por 10cm de comprimento, foram feitas pequenas bolas com as mãos e, em seguida, rolou-se as mesmas sobre uma lâmina de vidro fosco poroso até que foi obtido um cilindro semelhante ao do molde (Figura 33.A). Seguiu-se com a rolagem do material no vidro afim de que ele perdesse umidade. Esse procedimento foi repetido algumas vezes até que o cilindro criado começasse a fissurar devido a perda de umidade. O material fissurado foi dividido em cápsulas e inserido na estufa para a secagem.

O ensaio de limite de liquidez foi baseado na norma ABNT NBR 6459 (1984) e antes de iniciar o procedimento, o aparelho de Casagrande (Figura 33.B) foi calibrado pelo técnico responsável pelo laboratório. O ensaio foi realizado colocando-se uma pequena porção de solo em um recipiente de porcelana e adicionando-se água destilada até que fosse obtida uma pasta homogênea e semifluída. Após obtenção dessas características o conteúdo foi inserido no equipamento de Casagrande (Figura 33.C) e seguiram-se as demais recomendações da norma. Ao longo da execução desse ensaio, as amostras foram homogeneizadas, acrescentando-se quantias de água. No fim do ensaio, os valores foram plotados, onde o valor atribuído do LL é dado através da umidade correspondente a 25 golpes.

Figura 33. (A) Cilindros para p ensaio de limite de plasticidade; (B) Materiais utilizados no ensaio do limite de liquidez (C) Equipamento Casagrande preenchido com material.



Fonte: Autora, 2021.

O ensaio do peso específico real dos grãos foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6508/84 através do método do picnômetro. A sequência de Figuras 33.A, 33.B e 33.C., apresentadas a seguir, indicam alguns registros do dia do procedimento. A Figura 33.A indica a pesagem do funil acoplado ao picnômetro, a Figura 33.B o processo de retirada de ar do recipiente com o auxílio de uma bomba de vácuo e a Figura 33.C a pesagem do material após a retirada do ar do material.

Figura 34. Figura 34.(A) Taragem do picnômetro e funil; (B) Material vinculado a bomba de vácuo (C) Pesagem do picnômetro com material.



Fonte: Autora, 2021.

6.3.3 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento foi realizado conforme a norma americana ASTM d 3080/98 *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, sob condições seca e saturada.

O solo coletado para realização do ensaio foi coletado em campo através dos anéis de medidas 5x5x2cm como indica a Figura 35. As amostras foram então desembrulhadas do plástico filme e com o auxílio de uma espátula retirou-se as rebarbas do anel (Figura 36.A). O material da rebarba foi inserido em cápsulas individuais, identificado, pesado e depois levado à estufa para secagem e posterior pesagem da amostra seca.

Figura 35. Registro da coleta do material indeformado através dos anéis de cisalhamento direto.



Fonte: Autora, 2021.

A amostra moldada no anel foi confinada na célula bipartida da prensa por pedras porosas e placas com furos e ranhuras (dispostas no sentido perpendicular ao movimento horizontal imposto pelo equipamento), e presa junto a parafusos. Sobre a amostra confinada foi acoplado um cabeçote de compressão de carga normal com rótula de esfera. O corpo de prova depois de montado foi levado à prensa de cisalhamento, da marca Ronald Top S/A (Figura 36.B). Na caixa onde foi inserido o corpo de prova foi adicionado água para os ensaios em condições saturadas. Para que as amostras ficassem totalmente cercadas de água, os parafusos foram girados no eixo horizontal em aproximadamente 180° , separando as duas placas.

Em seguida, após a verificação dos extensômetros do equipamento o mesmo foi ligado e as medidas de deslocamento foram anotadas. Foram aplicadas tensões normais (kg/cm^2) nos valores de 0,5, 1,00 e 2,00 para cada cava e para as condições seca e saturada. Com as amostras cisalhadas, os planos de ruptura foram visualizados, como demonstra a figura 36.C. A escolha das tensões utilizadas para a realização dos ensaios seguiu os valores padrões utilizados no laboratório e podem ser conferidas na figura 37.

Figura 36. (A) Material cravado no anel; (B) Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto. (C) Amostra cisalhada após execução do ensaio.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 37. Carregamento a ser utilizado na prensa de cisalhamento direto.

Carregamento a ser Utilizado na Prensa de Cisalhamento Direto		
ANEL PEQUENO = 25 cm ²		
TENSÃO kg/cm ²	PÓRTICO SIMPLES	BRAÇO
0,50	6,25 kg	-
1,00	Sem peso	2,00 kg
2,00	Sem peso	7,00 kg
Constante da Máquina (k) = 0,1626545		

Fonte: Autora, 2021.

6.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE

A análise da estabilidade do talude foi realizada a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios geotécnicos de solo (Tabela 09) e da geometria da barragem determinada em campo, conforme ilustra a figura 38 a seguir. Para realização da análise de estabilidade foi utilizada a versão educacional 2021, do *Slide2* da *Rocscience*. A modelagem foi executada com base nos dados obtidos a partir dos ensaios realizados em condições naturais do terreno, ou seja, amostras não saturadas. As características do material de fundação da barragem foram baseadas no contexto pedológico da região da área de estudo.

Para elaboração dos modelos, utilizaram-se os seguintes parâmetros geotécnicos de solo:

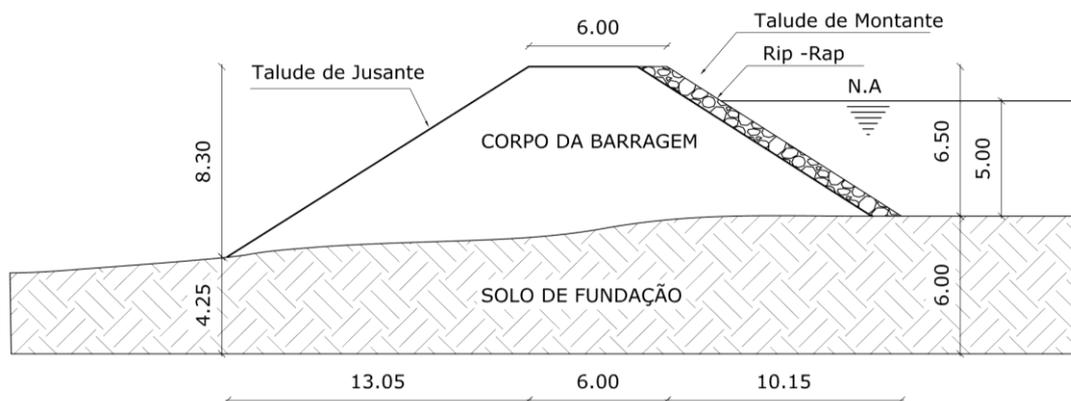
- ❖ Peso específico natural (kN/cm³)
- ❖ Coesão (kPa)
- ❖ Ângulo de atrito

Tabela 09. Parâmetros adotados para análise de estabilidade do talude na barragem Fonte do Mato.

Parâmetros adotados para análise de estabilidade			
Camada e Cava	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Superficial; Cava 2	15	2	38

Fonte: Autora, 2021.

Figura 38. Geometria proposta para a barragem Fonte do Mato.



Fonte: Autora, 2021.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios separadamente obtidos ao longo deste estudo. Iniciando com as investigações geofísicas e suas respectivas interpretações, na sequência, os ensaios realizados em laboratório para caracterização física e mecânica dos solos e por fim, a modelagem do talude, utilizando como critério de análise do fator de segurança os métodos de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado.

7.1 Análise geofísica

Os dados do levantamento geofísico de eletrorresistividade, na barragem Fonte do Mato, foram processados e apresentados em seções 2D, através de duas seções, sendo perfil 1, localizado na crista do talude e perfil 2, no pé do talude. Cada perfil investigado teve aproximadamente 100 metros de extensão horizontal e 30 metros de extensão vertical.

Os valores de resistividade da escala de cores nas seções foram padronizados em escala única em ohm.m na base log₁₀. A paleta de cores utilizada varia entre cores frias (tons de azul, violeta e verde) e quentes (tons de amarelo, laranja e vermelho). Para critérios de comparação e discussões

dos valores obtidos, optou-se por apresentar a correspondência dos valores para uma escala linear (Tabela 10), conforme proposto por Reynolds (1977), na tabela 01 apresentada no referencial teórico no item 5.6.2.

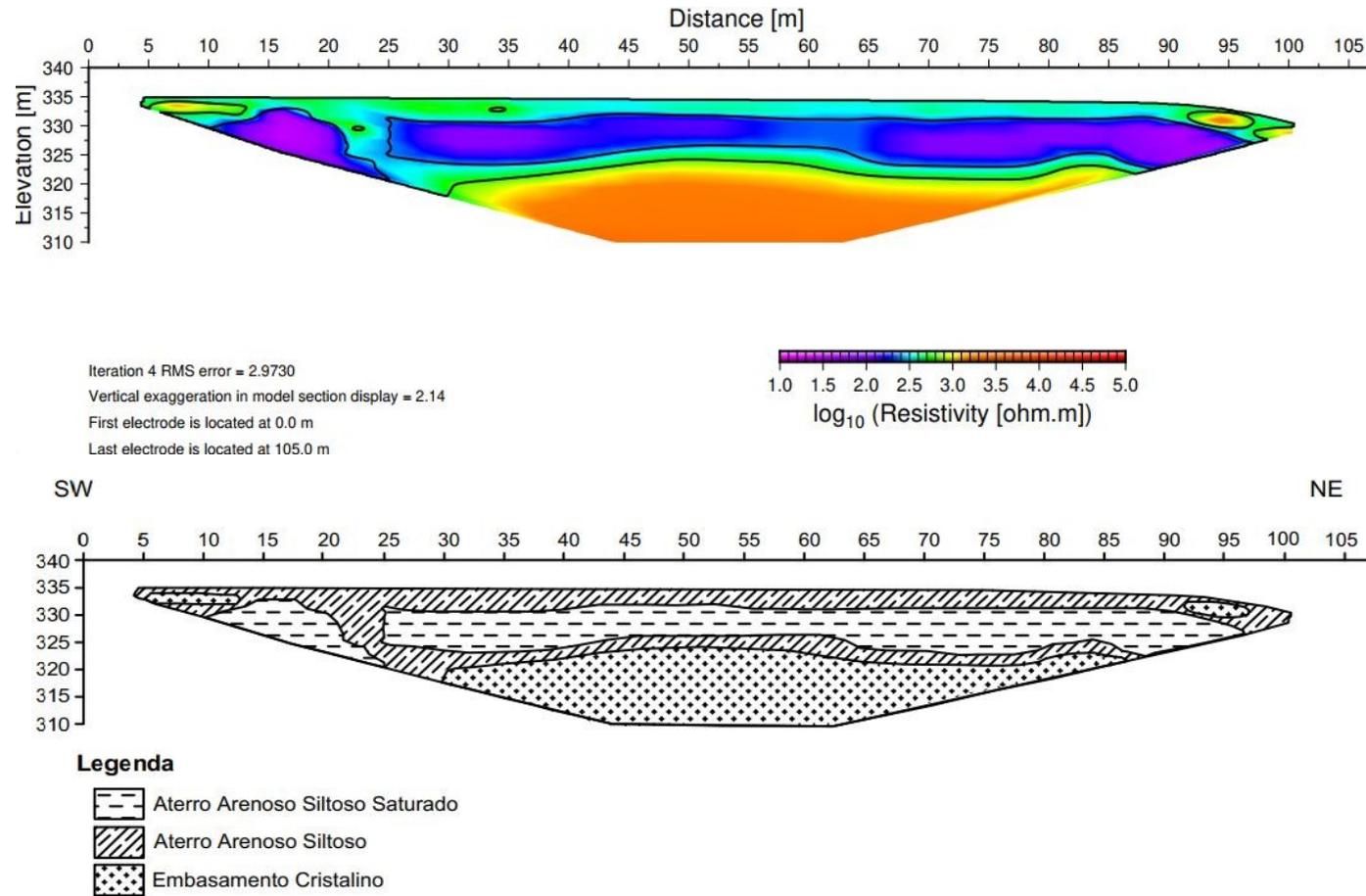
Tabela 10. Valores de resistividade em diferentes escalas.

Valores de Resistividade (ohm.m)	
Escala Log ₁₀	Escala Linear
1	10,00
1,5	31,62
2	100,00
2,5	316,23
3	1000,00
3,5	3162,28
4	10000,00
4,5	31622,78

Fonte: Autora, 2021.

Para cada seção, foram apresentados os valores de resistividade obtidos a partir do levantamento e suas respectivas interpretações geológicas. Sabendo-se que o talude estudado foi construído a partir de materiais de empréstimo, adotou-se que os primeiros 10 metros, aproximadamente, de profundidade correspondem a um aterro. Além disso, para ambas as seções, as resistências dos materiais investigados apresentaram valores oscilando em torno de 10 a 4000 ohm.m. Na figura 39 é apresentado o perfil 1 da seção localizada na crista do talude.

Figura 39. Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.



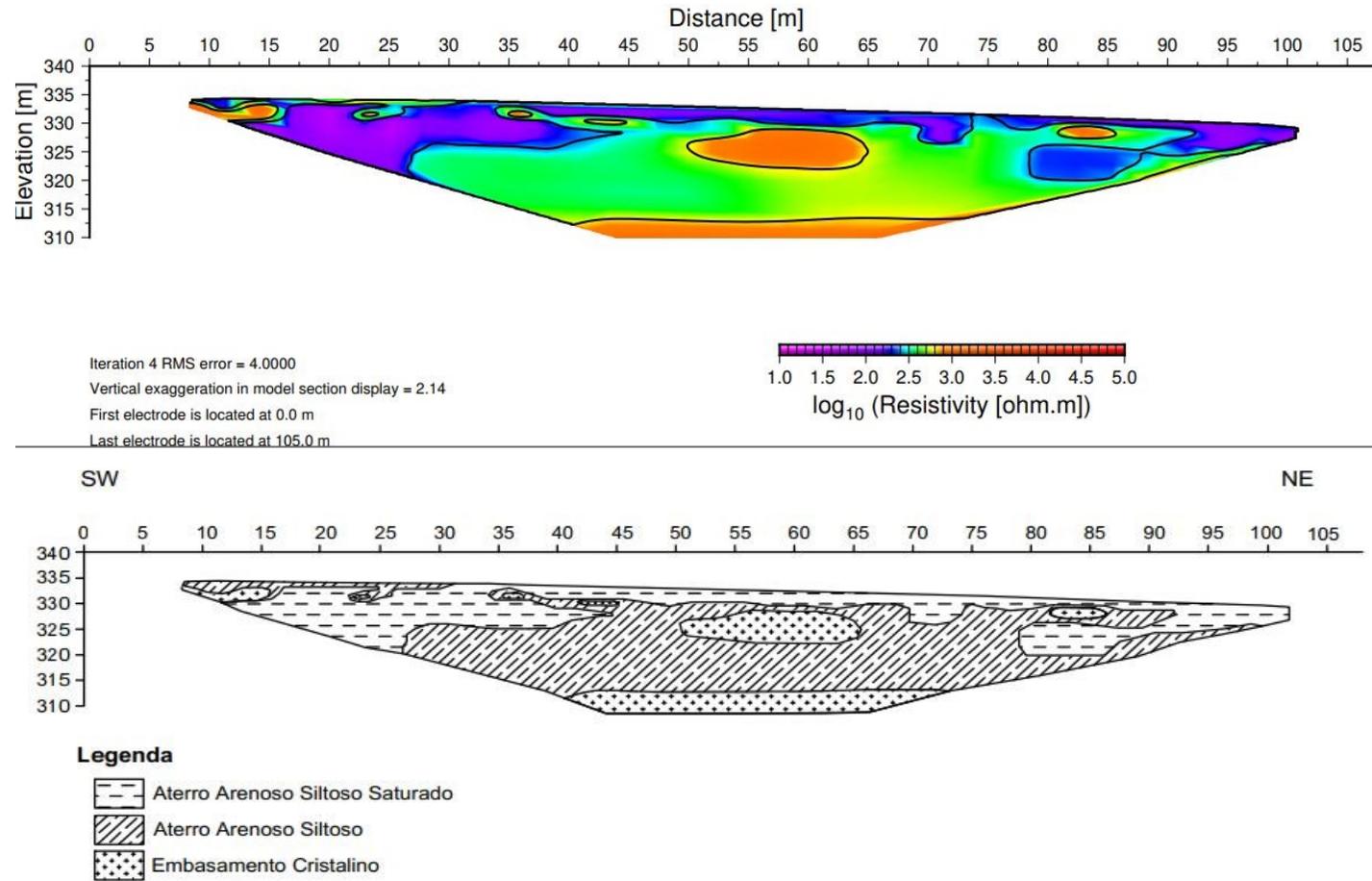
Fonte: Autora, 2021.

Os resultados obtidos para o perfil 1, situado na crista da barragem, demonstram nos três primeiros metros (335-333 metros) da topografia, uma anomalia horizontal e contínua, nas cores azul e verde com resistividade variando entre 215,19 a 501,19 ohm.m, que podem estar associadas às porções do topo do talude que não está em contato com o nível d'água do reservatório (porção não saturada). Além disso, nesta mesma profundidade, próximo a superfície, foram observadas pequenas anomalias com formato elipsoidal, de cores laranja e vermelho, com aproximadamente 1,5 metros de extensão horizontal que variam entre 794,33 a 1000 ohm.m, que podem estar associados aos matacões de rocha granítica observados em campo.

A próxima anomalia, disposta no intervalo de 333 a 325 metros em cores violeta e azul escuro, com valores de resistividade em torno de 10,0 a 199,53 ohm.m, apresenta-se parcialmente contínua ao longo do eixo horizontal da seção e pode ser relacionada a porção do talude que está diretamente em contato com o nível de água do reservatório (porção saturada). Ainda nessa camada, após uma descontinuidade de aproximadamente 2,5 metros de extensão, os valores de resistividades são os mesmos, o que sugere acúmulo natural de água no terreno proveniente da sutil variação de topografia da área.

Nas profundidades correspondentes a 325 a 320 metros, observa-se a ocorrência de uma anomalia com os mesmos valores de resistividade encontrados no topo da seção, variando entre 251,19 – 794,33 ohm.m indicando uma possível zona não saturada no terreno. Por fim, as profundidades que variam entre 320 a 310 metros, camada na qual corresponde a base da seção, contém anomalias que variam entre 794,33 – 10000,00 ohm.m, de cores laranja e vermelho que sugerem o embasamento cristalino do local, situado na Suíte Granítica de Caçapava do Sul. Na Figura 40 é apresentado o perfil 2 do levantamento geofísico realizado no pé do talude.

Figura 40. Perfil de caminhamento elétrico (Perfil 2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.



Fonte: Autora, 2021.

Os resultados para o perfil 2, situado no pé do talude, conferem anomalias de formatos irregulares, elipsoidais próximos ao topo e na zona intermediária da seção e anomalias horizontais contínuas na base. As anomalias presentes nos primeiros metros da seção estão situadas em profundidades em torno de 334 a 329 metros, em cores violeta e azul claro, com valores de resistividade variando de 10,0 a 199,53 ohm.m. Essa camada sugere uma zona saturada que pode ser a base da camada saturada contida no perfil 1 onde se tem o contato do nível de água do reservatório e o talude.

Nas bordas da seção, onde os valores de resistividade também apresentam variação entre 10,0 e 199,53 ohm.m, pode estar associada ao acúmulo de água em função de uma variação do terreno na porção a SW e ao acúmulo de água em virtude do contato entre os diferentes tipos de materiais da barragem, o terreno natural e o vertedouro na porção a NW. Ainda sob essa profundidade, próxima a superfície, ocorrem anomalias de forma elipsoidais de cores laranja e vermelho com uma média de 2,0 metros de extensão horizontal que variam entre 794,33 – 10000,00 ohm, sugerindo a ocorrência de matacões.

Em profundidades variando entre 329 a 315 metros, ocorrem uma anomalia com tons de verde e pequenos traços em amarelo, com resistividades variando entre 251,19 – 794,33 ohm.m, o que pode indicar uma zona não saturada. Ainda nesse intervalo de profundidade, uma anomalia de forma elipsoidal de aproximadamente 15 metros de extensão e 5 metros de profundidade ocorre em tons de laranja e vermelho sob resistividades entre 794,33 – 10000,00 ohm.m indicando a ocorrência de um bloco. Por fim, na base da seção, entre 315 a 310 metros, destaca-se uma anomalia horizontal contínua de cores laranja e vermelho claro, com o mesmo intervalo de resistividade do matacão citado anteriormente, 794,33 – 10000,00 ohm.m, possivelmente o embasamento cristalino da área de estudo.

A barragem Fonte do Mato está inserida em um terreno de rochas graníticas situado na Suíte Granítica de Caçapava do Sul. Em critérios de composição do solo, a área é composta por um solo argiloso vermelho amarelo, solo no qual é resultado da alteração das rochas ácidas da região. Como mencionado na Tabela 01 no item 5.6.2 do referencial teórico, os valores de resistividade atribuídos a rochas ígneas, são valores elevados em virtude da

dificuldade da corrente elétrica produzida passar nesse tipo de material. Os maiores valores de resistividade identificados em ambas as seções variaram em torno de 1000,00 a 10000,00 ohm.m o que coincide, aproximadamente, com as respostas características de corpos graníticos proposta por Reynolds (1977).

A variação entre os valores de resistividade de 10,0 a 199,53 ohm.m, baixos valores quando comparados a valores característicos de rocha ígnea citados acima, em ambos os perfis, reflete, possivelmente, ao material utilizado para construção do talude que, em contato com o nível d'água apresenta-se pouco resistivo. Esse material foi caracterizado como uma areia siltosa e, por possuir características de conter espaços vazios entre os grãos, pressupõe-se que existe um alto teor de fluido nos poros, por isso a resposta de baixa resistividade nos perfis. Esse mesmo intervalo de resistividade que ocorre na região NW na porção do contato o terreno natural e vertedouro podem ser diagnosticadas como uma zona saturada onde possa estar havendo infiltração.

Desse modo, as anomalias que apresentam valores de resistividade variando entre 794,33 – 10000,00 ohm.m, indicam a ocorrência de matacões no terreno, ocorrência essa, característica da cidade de Caçapava do Sul e, na base, o embasamento cristalino composto por rochas graníticas. Nas zonas onde ocorrem intervalos de resistividade variando de 10,0 a 199,53 ohm.m entende-se que é uma região onde o nível de água do reservatório está em contato direto com o talude. O talude, por caracterizar-se como um material predominantemente arenoso, possui mais espaços vazios entre os grãos que possivelmente estão preenchidos pela água e, conseqüentemente, resultou em zonas menos resistivas nas seções.

7.2 Caracterização geológica geotécnica dos solos

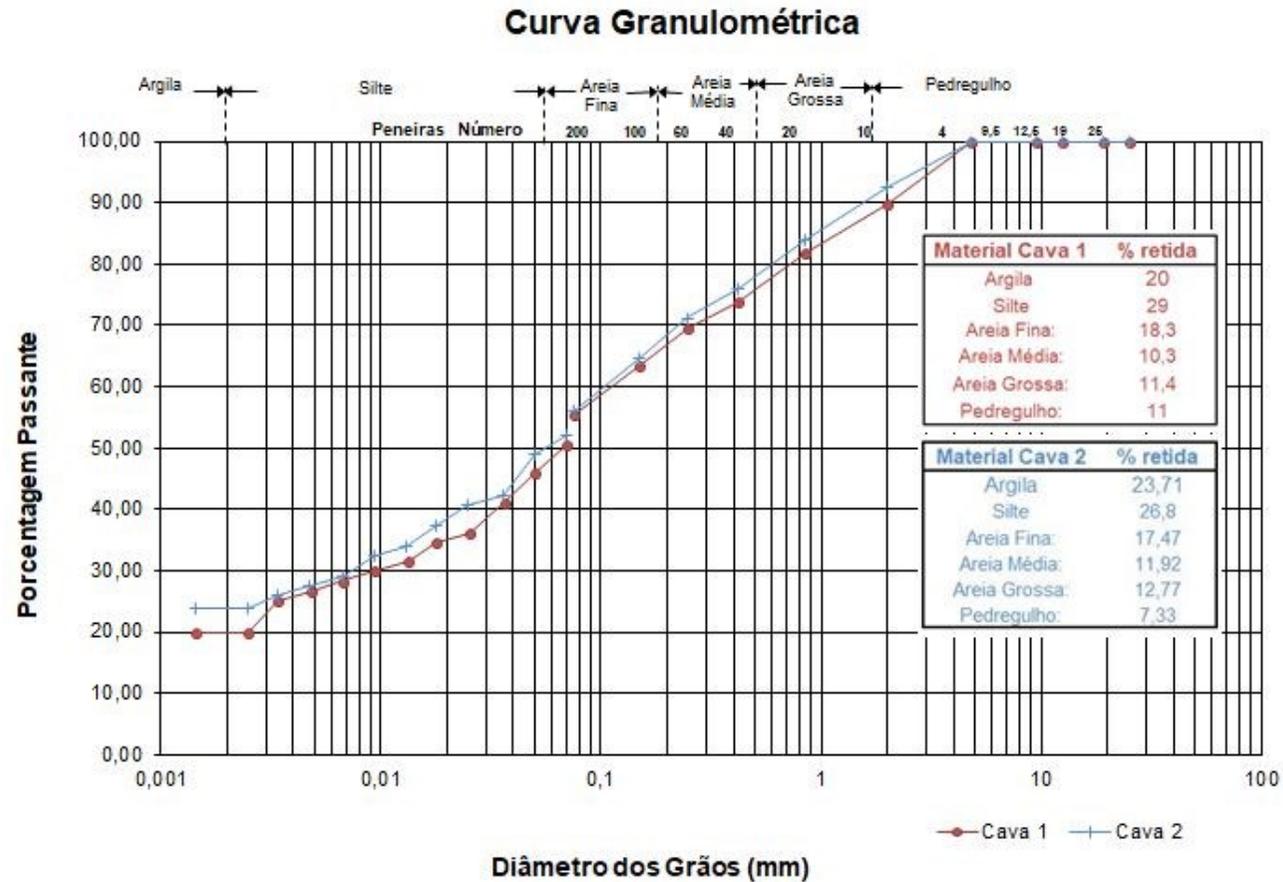
Neste tópico serão abordados os resultados e interpretação dos ensaios de caracterização física e mecânica dos solos coletados nas cavas 1 e 2 do talude.

7.2.1 Ensaio de granulometria

A Figura 41 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o solo da barragem com o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). Os resultados da análise granulométrica evidenciam a ocorrência, em ordem decrescente, de areia 40%, silte 29%, argila 20% e pedregulho 11% para a cava 1 e, para a cava 2, o predomínio de material também é areia, com 42,16%, seguido de silte 26,8%, argila 23,71% e pedregulhos 7,33%. Dessa forma, foi verificado que em ambas as cavas a fração areia é predominante, seguida por finos e texturalmente, ambos os solos podem ser classificados como uma areia siltosa. Em campo, a análise tátil-visual realizada com o material de ambas as cavas, conferem com a análise laboratorial.

Os resultados obtidos para análise granulométrica não apresentaram discrepâncias consideráveis sugerindo que o material de empréstimo utilizado para construção da estrutura foi de um mesmo local. A partir da fração que predomina no material de composição do aterro, pode-se afirmar que o mesmo trata-se de um aterro pouco compacto, tendo em vista a maior dificuldade de compactação de materiais arenosos em relação a materiais predominantemente argilosos.

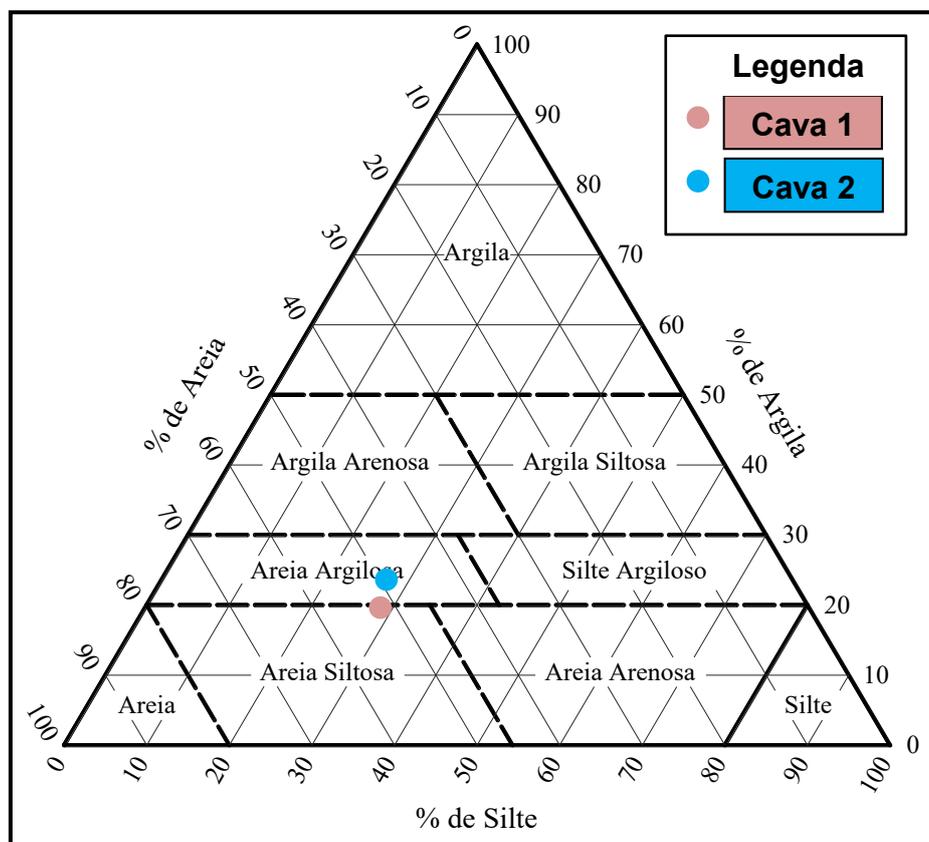
Figura 41. Curva granulométrica para os resultados da cava 1 e cava 2.



Fonte: Autora, 2021.

Conforme a classificação trilinear, que leva em consideração somente a granulometria, o solo é classificado como predominantemente arenoso em ambas as cavas, entretanto, para cava 1 classifica-se como uma areia siltosa e para a cava 2 como uma areia argilosa. Os valores para a cava 1 ficaram bem no limite entre uma areia argilosa e areia siltosa o que mostra a coerência com os resultados da granulometria. A Figura 42 apresenta o diagrama trilinear com a marcação dos pontos correspondentes ao solo das cava 1 e cava 2.

Figura 42. Diagrama trilinear de classificação do solo.



Fonte: Autora, 2021.

7.2.2 Limites de Atterberg

O solo foi classificado com base nos limites de Atterberg, conforme apresentado na tabela 11. Os valores de limite de liquidez (LL) apresentaram similitude em ambas as cavas, entretanto, para os limites de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP), apresentam uma pequena variabilidade. Para a

cava 1, o LP foi de 28% e IP de 25%, enquanto, para a cava 2, o LP foi de 34% e o IP de 19%. Desta forma, pode-se inferir que o solo da cava 1 enquadra-se como um material de alta plasticidade e o solo da cava 2, média plasticidade.

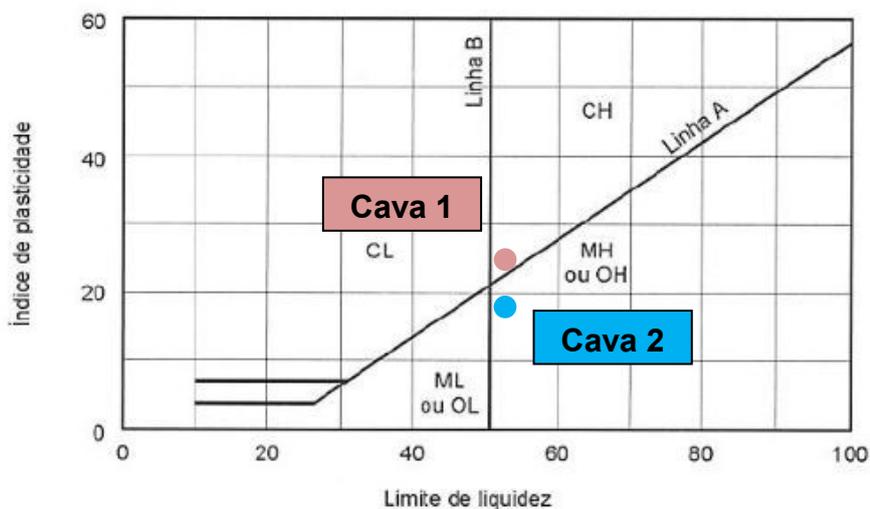
Tabela 11. Valores dos Limites de Atterberg para as cavas 1 e 2.

Amostra	Limite de Liquidez LL (%)	Limite de plasticidade LP (%)	Índice de plasticidade IP (%)
Cava 1	53	28	25
Cava 2	53	34	19

Fonte: Autora, 2021.

De acordo com a carta de plasticidade de Casagrande (Figura 44), classificação unificada, que serve para a classificação de um solo segundo as suas propriedades plásticas, o solo da cava 1 caracteriza-se como (CH) - solo argiloso de alta compressibilidade e o solo da cava 2 como (MH) – solo siltoso de alta compressibilidade.

Figura 43. Resultados dos limites de Atterberg inseridos na carta de plasticidade proposta por Casa Grande.



Fonte: Adaptado de Pinto, (2000).

7.2.3 Peso específico real dos grãos

Na tabela 12 são apresentados os resultados do peso específico real dos grãos para os solos da cava 1 e cava 2. Nota-se que ambos os solos analisados apresentaram pouca variabilidade, ou seja, com valores variando entre 27,61 a 27,31 kN/m³. Esses valores são consistentes com a mineralogia dos solos estudados, como o predomínio de quartzo, feldspato, muscovita e biotitas.

Tabela 12. Valores do peso específico dos sólidos das cavas 1 e 2.

Amostra	Peso específico dos sólidos γ_s(kN/m³)
Cava 1	27,61
Cava 2	27,31

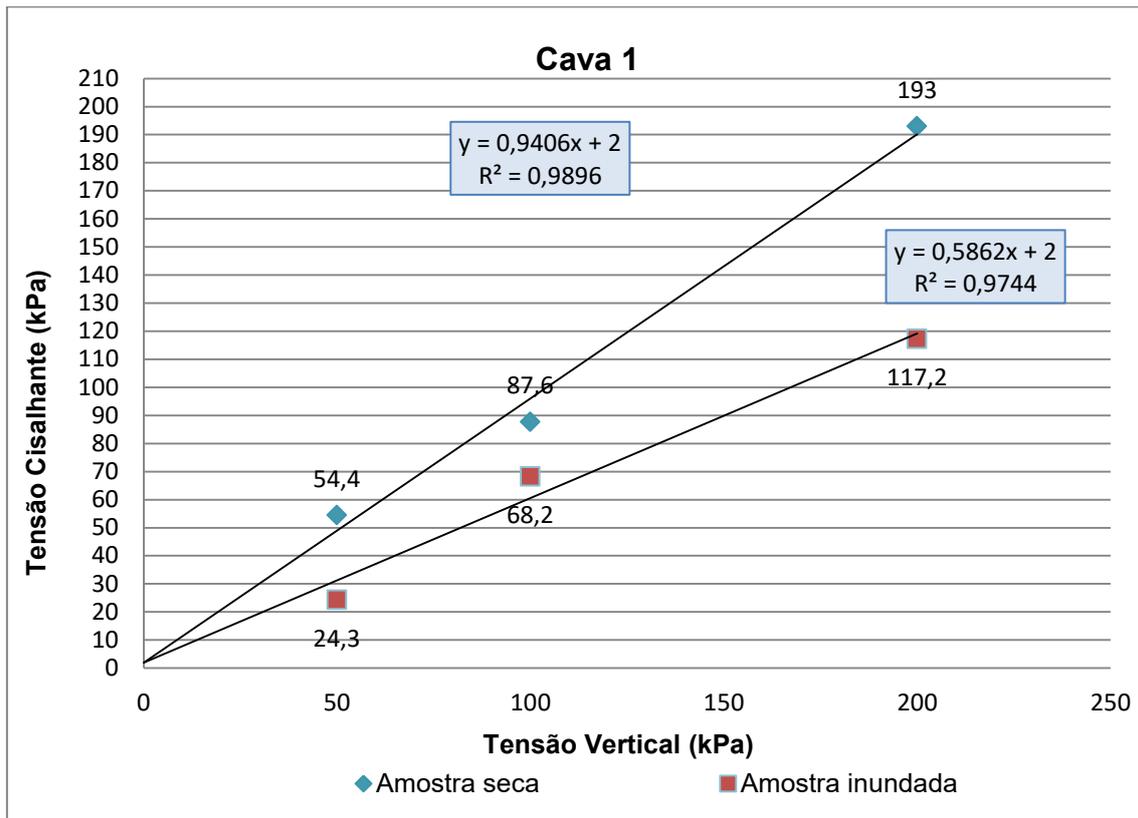
Fonte: Autora, 2021.

7.2.4 Cisalhamento direto

Os resultados do cisalhamento direto foram obtidos a partir de um conjunto de três ensaios sob diferentes tensões (25, 50 e 100 (kPa) aplicada ao plano de ruptura, para de fato definir a envoltória de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. Com a envoltória de cisalhamento definida, foi possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo em termos de tensões efetivas: ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo (coesão).

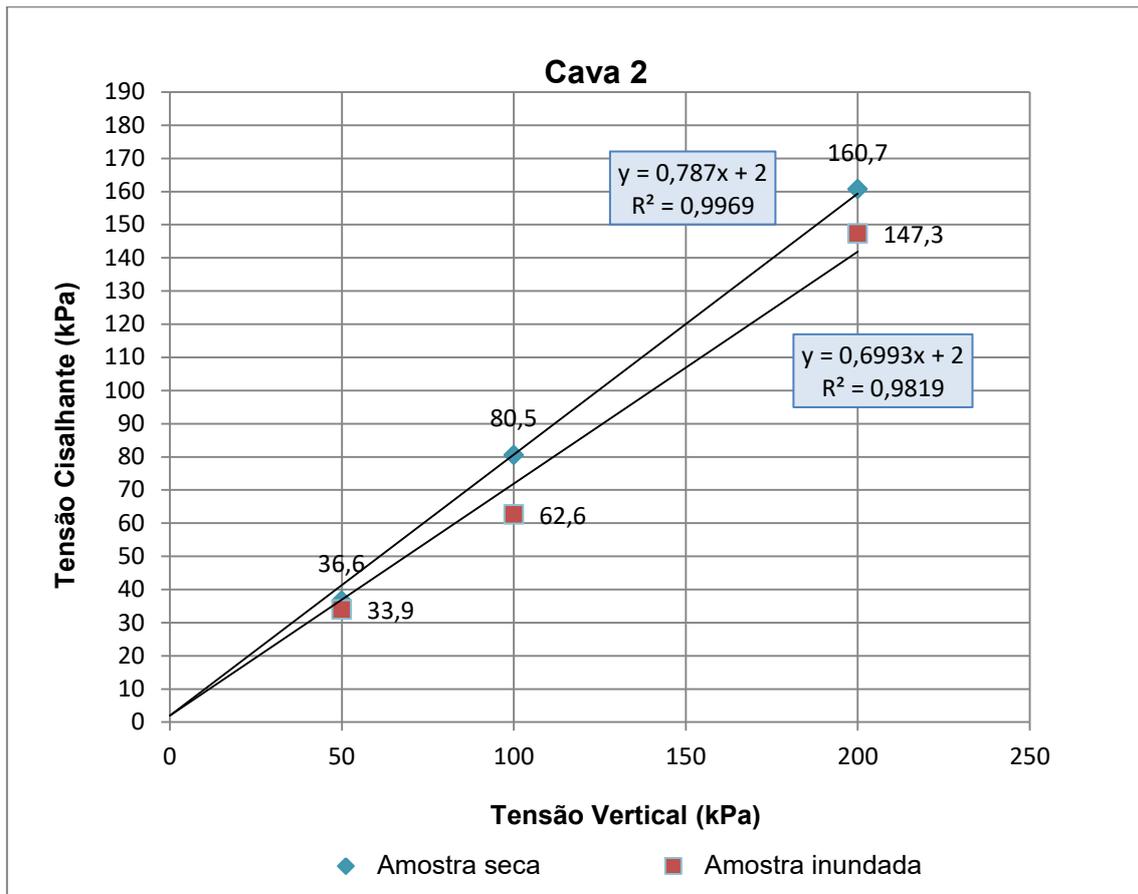
Conforme descrito na metodologia do trabalho, o ensaio de cisalhamento direto foi executado com material tanto da cava 1 quanto da cava 2, sob duas condições de umidades diferentes, seca (preservando a umidade de campo) e saturada. Na figura 45 e figura 46, são apresentados os resultados da tensão cisalhante versus tensão vertical, para cava 1 e cava 2, respectivamente.

Figura 44. Resultados de cisalhamento direto sob condições saturada e seco da cava 1.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 45. Resultados de cisalhamento direto sob condições saturada e seco da cava 2.



Fonte: Autora, 2021.

Observa-se que em ambas as cavas, as resistências de cisalhamento apresentam comportamentos crescentes para as tensões de 25 KPa, 100 KPa e 200 KPa. Além disso, a cava 1, para a condição seca apresenta ângulo de atrito superior a cava 2, com valores de $43,24^\circ$ e $38,2^\circ$, respectivamente, indicando maior resistência ao cisalhamento. Entretanto, o material da cava 1, quando submetido a saturação, apresentou comportamento diferente, resultando menor ângulo de atrito em comparação a cava 2, com valores de $30,37^\circ$ e $38,2^\circ$, respectivamente, possivelmente, pelo fato do material da cava 2 estar em condição mais compacta em comparação a cava 1, devido ao peso específico natural superior a cava 1 (Tabela 13), portanto, o solo da cava 2, na condição saturada apresenta maior resistência ao cisalhamento quando comparado ao solo da cava 1, sob as mesmas condições. Por conseguinte, observa-se que, ambas as cavas quando impostas a pior condição, ou seja,

saturando o material para realizar o ensaio, apresentaram valores de ângulo de atrito inferiores à condição seca.

Tabela 13. Resultados de ângulo de atrito, peso específico natural e coesão das cavas 1 e 2.

Amostra	Ângulo de atrito	Peso específico natural (g/cm ³)	Coesão (kPa)
Cava 1 - Condição Seca	43,24°	1,587	2
Cava 1 - Condição Saturada	30,37°	1,377	2
Cava 2 - Condição Seca	38,2°	1,496	2
Cava 2 - Condição Saturada	34,95°	1,834	2

Fonte: Autora, 2021.

Observa-se que os resultados de resistência (Tabela 14) ao cisalhamento para as condições saturadas, são inferiores a condição seca, para ambas as cavas analisadas. Essa característica confere o comportamento esperado, uma vez que, solos saturados tendem a apresentar menor coesão entre as partículas devido a interferência da água, pois, a tensão da água sobre o ângulo de atrito interno pode ser relacionado ao efeito lubrificante que a água desempenha ao recobrir as partículas sólidas. Desse modo, à medida que a tensão aplicada sobre a água do solo se eleva, os filmes de água presentes sobre as partículas vão se desarranjando, diminuindo o efeito lubrificante e, assim, elevando o atrito entre as mesmas.

Tabela 14. Resultados das tensões cisalhantes em kPa das cavas 1 e 2.

Cava 1			
Tensões Normais Aplicadas	50	100	200
Tensão de Cisalhamento Seco	54,4	87,6	193
Tensão de Cisalhamento Inundado	24,3	68,2	117,2
Cava 2			
Tensões Normais Aplicadas	50	100	200
Tensão de Cisalhamento Seco	35,4	80,5	160,7
Tensão de Cisalhamento Inundado	33,9	62,6	147,3

Fonte: Autora, 2021.

7.4.5 Análise de estabilidade do talude

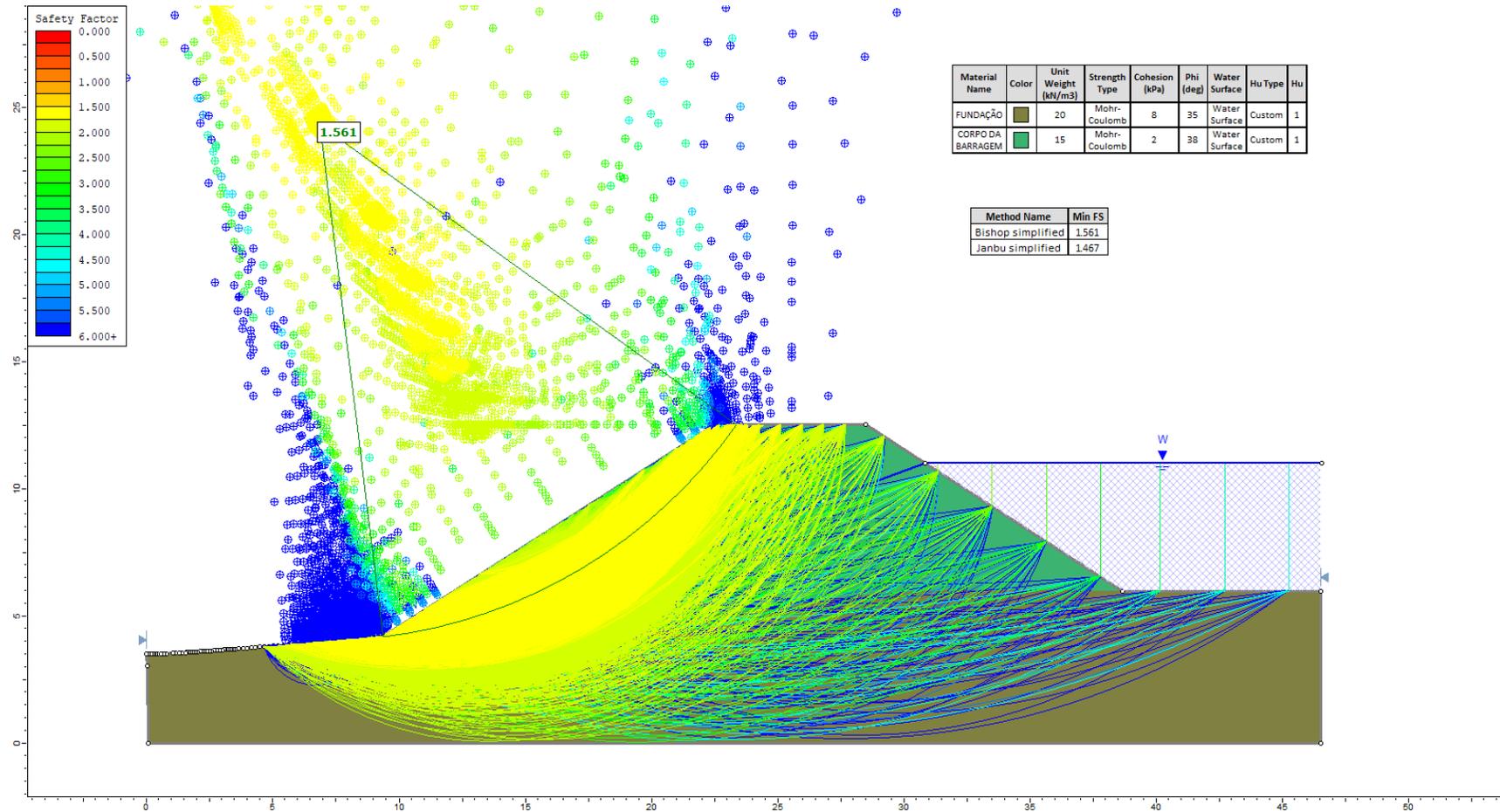
A modelagem foi realizada a partir dos parâmetros de resistência obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto com solo seco da cava 2 ($c' = 2$ kPa e $\varphi' = 38^\circ$) e peso específico de 15 kN/m³. Optou-se por utilizar esses dados, pois eles referem-se aos valores que correspondem às condições mais próximas do real do aterro e, quando comparada as condições secas da cava 1, apresentam-se mais críticas.

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 definido de forma estimada a partir da régua disposta no local, obtendo-se o valor de 5 metros como apresentado na geometria elaborada em campo (Figura 38) do item 6.4 do referencial teórico.

Nesse trabalho foram calculados os fatores de segurança pelos métodos de Bishop Simplificado (1955) e Janbu Simplificado (1958). O emprego do fator de segurança baseado no método Bishop Simplificado, se deu devido à vantagem de ser um método mais simples de aplicação e muito utilizado nessa área (SILVA, 2009). O método de Janbu Simplificado, também é considerado um método simples, quando comparado com os métodos mais preciso e complexos: Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967).

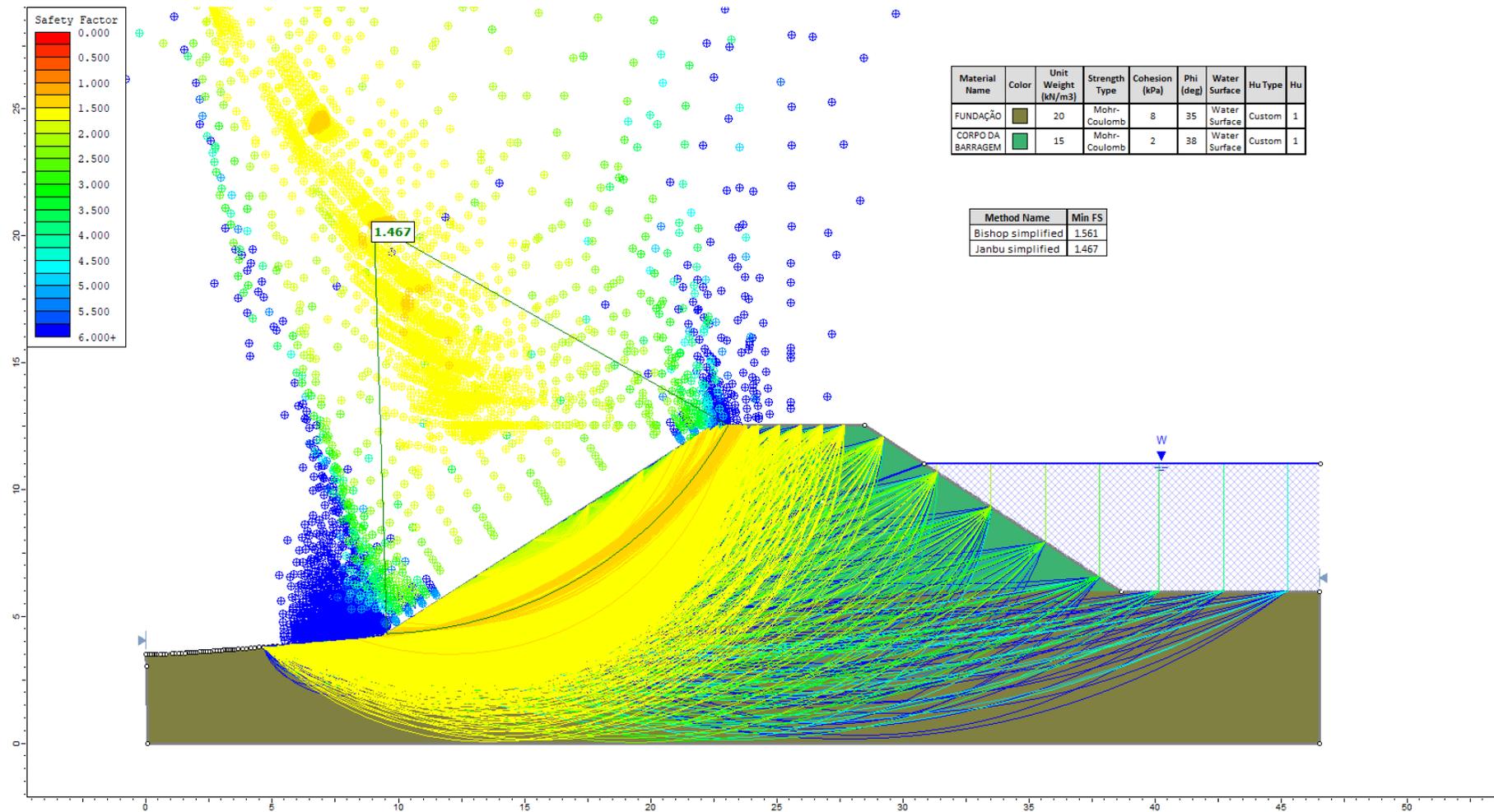
Os resultados obtidos na análise estão apresentados nas Figuras 47 a 48 a seguir. A figura 47 apresenta a análise obtida para o método de Bishop Simplificado onde verifica-se que o fator de segurança FS obtido é de 1.561 e a figura 48 apresenta a análise obtida para o método de Janbu Simplificado onde o fator de segurança FS obtido é de 1.467.

Figura 46. Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado à barragem pelo método de Bishop Simplificado.



Fonte: Autora, 2021.

Figura 47. Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado à barragem pelo método de Janbu Simplificado.



Fonte: Autora, 2021.

Baseado no valor mínimo para segurança de maciços de barragens de reservação de água fornecidos pela NBR 13.028 (2017), conforme comentado no item 5.8.2 do referencial teórico e apresentado na tabela 07, apenas a modelo obtido com base no fator de segurança do método Bishop Simplificado atende aos critérios da norma mínima de 1,5. O modelo obtido a partir do método de Janbu Simplificado apresentou o fator de segurança de 1,467 e, sob um critério conservador, interpretou-se que o mesmo não atendeu as condições estabelecidas pela norma.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises geológicas, geotécnicas e geofísicas propostas nos objetivos desse trabalho foram realizadas e demonstraram-se como metodologias satisfatórias para o estudo da análise de integridade física e de estabilidade do talude da Barragem Fonte do Mato. Como produto, foram obtidas seções de investigação geofísica e suas respectivas interpretações, gráficos e tabelas de caracterização geotécnicas dos solos e modelagens computacionais de estabilidade do talude.

No que diz respeito à investigação geofísica a partir da técnica de caminhamento elétrico associado ao arranjo dipolo-dipolo foi possível visualizar de forma bidimensional as variações laterais contidas no talude, delimitar as anomalias e interpretá-las geologicamente. O emprego desse método combinado ao arranjo dipolo-dipolo possibilitou uma resolução bidimensional de ambos os perfis investigados.

Na seção 1 o comportamento apresentou-se de forma predominantemente homogêneo, com poucas variações laterais onde a utilização de outros métodos geofísicos, como a sondagem elétrica vertical, também poderia fornecer resultados bem similares. Na seção 2 o comportamento lateral apontou variações importantes quanto à resistividade dos materiais onde em um mesmo intervalo de profundidade, ocorreram anomalias de variaram de 10,00 a 10000,00 ohm.m. A anomalia de resistividades entre 10,0 a 199,53 ohm.m localizada na região que sugere ser o

contato entre o terreno natural e o vertedouro, presente nos dois perfis, deve ser avaliada mais criteriosamente através da realização de novas investigações. Isso se dá porque anomalias que indicam saturação, nessas regiões, geralmente são associadas a infiltrações que, ao longo do tempo, podem comprometer a segurança do maciço.

De modo geral, para melhor discussão entre os dados e diminuir possíveis ambiguidades que a investigação baseada em um único método pode resultar, recomenda-se a execução de novas investigações geofísicas baseadas em outros métodos disponíveis na Universidade. Além disso, a realização de perfis de investigação transversais ao longo do talude estudado para que seja possível avaliar possíveis anomalias que possam estar associadas à infiltração.

Os ensaios de caracterização física dos solos demonstraram que os materiais coletados das cava 1 e da cava 2 são predominantemente arenosos. Com base nos resultados da curva granulométrica e do diagrama textural percebeu-se pequenas variações, sendo que na curva os solos das duas cavas foram classificados como uma areia siltosa e, no diagrama, a cava 1 como areia siltosa e a cava 2 posicionada bem no limite entre uma areia siltosa e areia argilosa. O fato dos materiais terem apresentado composições similares indica que, possivelmente o material de empréstimo utilizado na construção do talude foi de uma mesma região. Solos arenosos geralmente são utilizados em barragens como materiais de filtragem (ROMA, 2011). Com mencionado anteriormente, os solos predominantemente arenosos só devem ser utilizados em construção de barragens quando empregados em maciços de jusante. Em casos em que não se tem alternativa de material, deve-se realizar um procedimento de compactação com devida atenção. Atentando-se aos resultados obtidos, recomenda-se a realização de ensaios de compactação para avaliar o grau de compactação do aterro atende as especificações de normas técnicas destinada a barragens de terra.

Na determinação dos limites de Atterberg, a amostra da cava 1 foi classificada como solo de alta plasticidade ($20 < IP < 40$) e a amostra da cava 2 como material de média plasticidade ($10 < IP < 20$). Com isso, baseando-se na Classificação Unificada dos Solos para solos finos, conforme demonstra a

Figura 44 do item 7.2.2 do referencial teórico, o solo da cava 1 é classificado como uma argila de alta compressibilidade e a cava 2 como um silte de alta compressibilidade.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto foram realizados sob condições secas e saturadas. As envoltórias de resistência mostraram-se bastante lineares, com coeficientes de linearidade (R^2) superiores a 0,97. Para os ensaios inundados, notou-se o comportamento esperado do efeito da água entre as partículas, onde os parâmetros do ângulo de atrito e resistência tiveram redução em relação ao solo em condição natural. Ademais, a realização desse ensaio foi de extrema importância, pois a partir dele foram extraídos os valores necessários dos parâmetros geotécnicos de solo para entrada no software de modelagem.

A partir do modelo de geometria, dos parâmetros de resistência dos solos e do nível freático, analisou-se a estabilidade do maciço. A análise de estabilidade foi realizada a partir dos métodos de equilíbrio limite Bishop Simplificado e Janbu Simplificado. Os resultados obtidos a partir do software Slide2 demonstraram um fator de segurança mínimo vigente na norma por ruptura circular para o método de Bishop Simplificado ($FS > 1,5$), mas, para o método de Janbu Simplificado não atendeu ao valor mínimo estipulado pela norma NBR 13.028/2017, ($FS < 1,5$).

É sabido da literatura que, usualmente, o método de Bishop Simplificado fornece resultados maiores que os valores determinados com o método Janbu Simplificado, uma vez que esse último é mais flexível e sua formulação pode ser aplicada para superfícies circulares ou não circulares. Entretanto, sabendo-se que o fator de segurança mínimo é obtido por equilíbrio limite, existem algumas limitações nesse método que precisam ser reavaliadas, e que não garantem a precisão acurada do fator de segurança da barragem. Recomenda-se, para trabalhos futuros, que sejam realizadas modelagens com métodos mais rigorosos e sob condições de solo saturado. Além disso, tendo em vista 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 sofam o mínimo de perturbação possível e os novos valores ensaiados sejam

comparados com o deste estudo. Ainda sobre isso, 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.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1968. 6p.

_____. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a. 13p.

_____. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 3p.

_____. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. Origem: MB-27.

_____. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1968. 6p. Origem: MB-30.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028 – Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água,** 2017.

AB'SABER, A. N. Megageomorfologia do território brasileiro. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T (Eds.). **Geomorfologia do Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. P71-106.

AGUIAR, O. P. D. **Contribuição ao Estudo do Índice de Segurança de Barragens – ISB**. 2014. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.

ALMEIDA, E.F.M. & HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo, Blücher, p. 378, 1984.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas**. Outubro de 2012. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/rels/RF34.Relat%C3%B3rio%20Final%20da%20Concep%C3%A7%C3%A3o%20Geral%20do%20SIEMEC.pdf>. Acesso: 20 de junho de 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens**. 2017. Brasília, 84 p, 2017.

ANA – Agência Nacional de Águas. Resolução nº 91 de 02 de abril de 2012. Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem. Brasília, 2012.

ANDRADE, Natalia Resende. **Avaliação dos procedimentos de outorga para implantação de barragens**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 2012.

ARTHUR, H. G. Design of small dams. 2. Ed. **A Water Resoucers Technical Publication** – United States Department of the Interior Bureau of Reclametion.1973.

Babinski M., Chemale Jr. F., Hartmann L.A., Van Schmus W.R., Silva L.C. 1996. **Juvenile accretion at 750-700 Ma in southern Brazil**. Geology , 24:439-442.

BERETTA, F.; RODRIGUES, A.; PERONI, R.; COSTA, J. F. **Uso De Vant Para Automatização De Classificação Litológica Em Frente De Lavra A Céu Aberto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINAS A CÉU ABERTO E MINAS SUBTERRÂNEAS, 9., 2018, Belo Horizonte.

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

BITENCOURT, Maria de Fátima. **Metamorfitos da Região de Caçapava do Sul, RS: Geologia e Relações com o Corpo Granítico**. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1., 1983, Porto Alegre. Ata. Porto Alegre: Ssbgeo, 1983. p. 37 - 47.

BOSCO, 2019. **ANÁLISE GLOBAL DE ESTABILIDADE DE TALUDES E SETORIZAÇÃO DE CAVA EM UMA MINA DE MÁRMORE**. Trabalho de Conclusão de Curso. Caçapava do Sul, RS, Brasil, 2019.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. ii,

121 f. Tese (livredocência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

BRAGA, A. C. **O método de induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. ii, 121 f. Tese (livredocência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília/ DF, 2010.

_____. **Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei 9984, de 17 de julho de 2000. Brasília: Diário Oficial da União, 21 set. 2010.

BROWN, David. et al. 501 **Desastres mais devastadores de todos os tempos**. Trad. Catharina Pinheiro. 1ª edição brasileira. São Paulo: Editora Lafonte, 2012.

CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.

CAMARGO, Wander Douglas Pires de. **Estudo de acontecimentos históricos de ruptura de barragens**. 2014. 69 f. Trabalho de Conclusão de

Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

CAMARERO, P.L. **Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos.** 2016. 97f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2016.

CAPELLI, 2016. **Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos.** 6. ed. rev. ampl. e atual. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 256 p.

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

CASAGRANDE, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands - a critical review. Proc. 5th Pan-American Conference, Argentina, 81-133

CASTRO, G. (1969). **Liquefaction of sands.** Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

CASTRO, G. & POULOS, S.J. (1977). **Factors affecting liquefaction and cyclic mobility.** Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT6), 501-516.

CECCATO, 2018. **Processo Erosivo: Estudo de caso da Estrada de acesso a Cascata do Salso – Caçapava Do Sul, RS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Caçapava do Sul, RS, Brasil, 2018.

CEDERGREN, H. R. (1989). **Seepage, drainage, and flow nets.** New York: John Wiley & Sons, 1989 465 p.

CRAIG, R. F. **Craig Mecânica dos Solos.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 400 p.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras, casos históricos, materiais de construção, projeto.** São Paulo – SP. Editora Oficina de Textos. 1996. 648p.

CESTARI JUNIOR, E. **Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens: UHE Três irmãos estudo de caso.** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2013.

CHUGH, A. **Embankment Dams – Chapter 1: General Design Standard Phase 4.** U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO – USA, 2011.

COELHO, F. L. C. T.; BRITO, J. L. N. e S. **Fotogrametria Digital.** Rio de Janeiro: EDUERJ, 196p. 2007.

COLLISCHONN, W. **Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 1997.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens. São Paulo:** Oficina de Textos, 2012. 352 p.

COURA, Mariana Mendes. **APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA.** 2019. Tese de Mestrado – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2019.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Thomson, 2007. 561 p. il.

DAS, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 6 ed. São Paulo : Thomson Learning, 2007. 562p

ECHAGUE, 2019. **Estudo de uma Barragem de Terra com Ênfase na Análise Estrutural e Investigação Geofísica.** Trabalho de Conclusão de Curso. Caçapava do Sul, RS, Brasil, 2018.

ELETROBRÁS, CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2003, “**Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**”. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB).

ELIS VR. 1999. **Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos.** Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 264 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA SPI, 2013.

Emiroglu, M.E. (2008). **Influences on Selection of the Type of Dam**. International Journal of Science & Technology, 3, 173-189.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para localização, projeto e construção. Roma: FAO, 2011. Disponível em: . Acesso em: 02 ago. 2021.

FARIAS, W. M.; ROLIM, J. A.; CARVALHO, J. C.; BOAVENTURA, G. R.; NETO, P. M. S. Proposição de metodologia para granulômetro a laser em solos tropicais. 6 f. In: Cobramseg, 2010.

Fellenius, W. (1936). **Calculation of the stability of earth dams**. 2nd Congress of large Dams, pg 463.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais**. Volume 1. Primeira Edição. Oficina de Textos, São Paulo, 2016.

Fiori, Alberto Pio e Carmignani, Luigi. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes** - 2 ed. Ver. E ampl. - Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

GANDOLFO, O. C. B. **Ensaaios geofísicos**. Notícias da construção, São Paulo, p. 56 - 57, 01 out. 2012.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. 2007. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade**. Revista Brasileira de Geofísica.

Gallas, J. D. F. (2000) **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. Tese de Doutorado, UNESP, Rio Claro, 259p.

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

GERSCOVICH, D.M.S, 2008, Notas de Aula- Estabilidade de Taludes, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012 I. 166 p.

GIANI, G. P. (1992). **Rock Slope Stability Analysis**. A. A. Balkema, 361p.

Goodarzi, E., Shui, L. T., Ziaei, M. and Haghizadeh, A. (2010). "Estimating probability of failure due to internal erosion with event tree analysis." *European Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 935-948

GONÇALVES, 2016. **Utilização do Método de Eletroresistividade para Mapear Agentes Causadores de Instabilidade de Taludes No Campus da UFBA**. Trabalho de Conclusão de Curso. Salvador, BA, Brasil, 2016.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: segunda aproximação**. Série técnica PRODEPEF, Brasília, n. 11, p. 1 - 66, 1978.

Gregoretti, C., Maltauro, A. & Lanzoni, S. 2020. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed. *Journal of hydraulic engineering* 136(11): 969-876.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1984). **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavações**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2a ed. São Paulo, 195p
DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson, 2007. 561 p. il.

Hartmann, F Chemale Jr, RP Philipp. 2007. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. Lanuzzi R. & Frantz JC.(Org.) 50, 97-123.

HEAD, K. H.; EPPS, R. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1981.

HOEK, E.; BRAY, J.W. (1981). **Rock Slope engineering**. The Institution of Mining and Metallurgy. 3 ed., London. 358p.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná**. Disponível em: <http://andorinha.epagri.sc.gov.br/consultaweb/site/busca?b=ad&id=37706&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22IAPAR.%22&qFacets=autoria:%22IAPAR.%22&sort=&paginaAtual=1>. Acesso em: 20 de abril de 2020.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados Climáticos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>. Acesso em: 30 de agosto 2020.

JANBU, N. (1973). **Slope stability computations**. Embankment-Dam Engineering Casagrande volume, R.C Hirschfeld & S.J.Poulos, John Wiley, New York, USA, pp.47- 86.

JAMBU, N. (1968). **Slope stability computations**. Soil mechanics and foundation engineering report, Technical University of Norway, Trondheim.

JANSEN, R.B. 1988. Introduction. In: **Advanced Dam Engineering: for design, construction and Rehabilitation**. Editor Robert B. Jansen. New York: Van Nostrand Reinhold, 811p.

JESUS, L. S. **Estudo da permeabilidade dos solos de fundação do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru / SP**. 2012. 190f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3. Ed. Wiley-Blackwell Science Ltd, 2002.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. **Environmental geology: handbook of field methods and case studies**. Springer Science & Business Media, 2007.

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. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1969). **Soil mechanics**. New York: J. Wiley. Ix, 553p.

LEITE, J.A.D., MCNAUGHTON, N.J., HARTMANN, L.A., CHEMALE JR., F. & REMUS, M.V.D. **SHRIMP U/Pb zircon dating applied to the determination of tectonic events: the example of the Caçapava do Sul Batholith, Pedreira Inducal, Caçapava do Sul, Brazil**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5, Anais..., Gramado, RS, pp. 389- 390, 1995.

LEMOS, R, C. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa

Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Recife, 1973. 431 p. (Boletim Técnico nº 30).

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. Vol. 61. Edusp, 2005.

LIMA, F. N. **Avaliação das probabilidades de falhas em barragens, associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: Estudo de caso da PCH Cajuru**. Dissertação. Pósgraduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.

LIN, C. et al. Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. **Journal of GeoEngineering**, v. 8, n. 2, p. 61-70, 2013.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

LOKE, M. H. 2000. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys**. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia. 67. p., 2000.

MACIEL, F. C.L. (2008). **Introdução à Geologia de Engenharia**. 3a. ed. Ed. da UFSM, Santa Maria, 310 p.

Martin, T. E., & McRoberts, E. C. (1999). Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams. In Proceedings of the Sixth International Conference on Tailings and Mine Waste, Vol. 99, 287-302.

MANSO, E. **Análise Granulométrica dos solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. 113 f. UnB. Brasília, 1999.

MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento**. Juiz de Fora: UFJF, 2004. Apostila da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf>. Acesso em 30 junho. 2018

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de Geotecnia**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

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

MATOS, A. T.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Barragens de terra de pequeno porte. Viçosa, MG: Editora UFV. 2012, 136 p.: il.

MORGENSTERN, N. R.; SANGREY, D. A. (1978). **Methods of Stability Analysis**. Landslides, Analysis and Control. Special Report 176, National Academy of Sciences, p.155-169, Washington D.C.

MORGENSTERN, N. R. y Price, V. E. (1965). **The Analysis of Stability of General Slip Surfaces**. Geotechnique, Vol. 15, No.1, pp.79-93.

MORENO, J.A. **Clima do Rio grande do Sul**. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://revistas.fee.tche.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/3236>. Acesso em: 19 de março de 2020.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. Nova Yorque: Cambridge University Press, 2000.

NETTO, Leonides Guireli. Análise de fluxo no interior de barragens de terra a partir do Método do Potencial Espontâneo (SP). Rio de Janeiro: Congresso Brasileiro de Geologia, 2018. Disponível em: <

<http://cbg2018anais.siteoficial.ws/anexos/st16/4309.pdf> >. Acesso em 01 Jun. 2021.

PANTHULU, T. V. et al. Detection of seepage paths in earth dams using selfpotential and electrical resistivity methods. **Engineering Geology**, v. 59, n. 3-4, p. 281-295, 2001.

PAIM, P.S.G., CHEMALE Jr., F. & LOPES, R.C. **A Bacia do Camaquã**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) *Geologia do Rio Grande do Sul*, Edições CIGO/UFRGS, pp. 231-274, 2000.

PASSARINHO, Nathalia. **Tragédia com barragem da Vale em Brumadinho pode ser a pior no mundo em 3 décadas**. BBC News. 2019.

Passos, N. C. S. T. (2009). **Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaios de Campos—Um Estudo de Caso**. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

PERINI, Daniel Solsti. **Estudo dos Processos Envolvidos na análise de risco de barragens de terra**. 2009. 149 f. Tese de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PEIXOTO, Isabella. **Ensaios de caracterização de solos**. Igeológico. Disponível em: <<http://igeologico.com.br/>>. Acesso em: 05, junho e 2021.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos**. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

PORCHER, C. A. & LOPES, R de C. 2000. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul. Folha 1:250.000.** Estado do Rio Grande do Sul. CPRM.

POULOS, S.J. (1981). **The steady state of deformation.** *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, volume 107, n. GT5, 553-562.

MADEIRO, Carlos. **Brasil registrou 65 mortes em 9 incidentes com barragens entre 2001 e 2018.** UOL , Alagoas, p. 1, 2 fev. 2019. Disponível em: .Acesso em: 03 abr. 2021.

MATURANO, R. H. M. A. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito.** Rio de Janeiro, 2012. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

REMUS, M. V. D, et al. 2000. **Distal Magmatic-Hydrothermal Origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria Pb, Zn (Cu-Ag) Depósitos, Southern Brazil.** *Gondwana Research*, v. 3, n. 2, p. 155-174.

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

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

RINÉART, R. V., PAREKH, M. L., RITTGERS, J. B., MOONEY, M. A., & REVIL, A. **Preliminary implementation of geophysical techniques to monitor embankment dam filter cracking at the laboratory scale**. In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Software Engineering (ICSE), 2012.

ROBINSON, E. S. **Geoelectrical surveying**. In. Basic Exploration Geophysics. [S.I.]: John Wiley & Sons Inc., p. 445-498, 1988.

SPENCER, E. (1967). **A Method of Analysis of Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces**. Geotechnique, Vol.17, No.1, pp.11-26.

SHARMA, V.P. **Environmental and Engineering Geophysics**. 2º Edition United Kingdom, Cambridge University Press, 2002.

STARK, T.D. & MESRI, G. (1992). **Undrained shear strength of liquefied sands for stability analysis**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118(11), 1727-1747.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

SOLIANI Jr., E. 1986. **Os dados geocronológicos do Escudo Sul-riograndense e suas implicações de ordem geotectônica**. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, 425 p.

SOUZA, Luiz Antonio Pereira de. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TAGUCHI, G. **Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management – A Frame Work**. Dissertação de Mestrado, University of British Columbia, Canadá, 89 p. 2014. VICK, S. G. Analyses of flow failures of mine tailings dams and investigation of flow failures of tailings dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, v.110, p. 454-456, 1984.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. (1990). **Applied Geophysics**. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

TERZAGHI, K. et al. **Soil mechanics in engineering practice**. John Wiley & Sons, 1967.

TERZAGHI, K. (1950). **Mechanism of Landslides**. Havard University. Publicação 488, p.88-123.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. & MESRI, G. (1996). **Soil Mechanics in Engineering Practice**, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 549 p.

TERZAGHI, K. e PECK, R. B. **Estabilidade de encostas e taludes em cortes a céu aberto**. In: *Mecânica dos solos na prática de engenharia*. Tradução de A.J. da Costa Nunes e M. de L.C. Campello. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.

TONUSSI, Artur Pagotto. Estudo de ruptura de barragem por piping. Florianópolis: UNISUL, 2017. 65 p.

UEMURA, S. **Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Rupturas de Barragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009, 160p.

VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 212 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.

VORONKOV, O. K. et al. **Geophysical methods and identification of embankment dam parameters**. In: ISC-2). p. 593-599, 2004.

WORLD COMMISSION ON DAMS (Ed.). **Dams and development: a new framework for decision-making**. London: Earthscan, 2000.

XIONG, Yi. **A Dam Break Analysis Using HEC-RAS**. Journal Of Water Resource And Protection. Mississippi, p. 370-379. 28 mar. 2011.