

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JORGE TOMÁS TROVÓ ECHAGUE

**ESTUDO DE UMA BARRAGEM DE TERRA COM ÊNFASE NA ANÁLISE
ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA**

**Caçapava do Sul
2018**

JORGE TOMÁS TROVÓ ECHAGUE

**ESTUDO DE UMA BARRAGEM DE TERRA COM ÊNFASE NA ANÁLISE
ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA**

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. Maximilian Fries

Coorientador: Prof. Dr. José
Waldomiro Jiménez Rojas

**Caçapava do Sul
2018**

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) .

E18e Echague, Jorge Tomás Trovó
ESTUDO DE UMA BARRAGEM DE TERRA COM ÊNFASE NA
ANÁLISE ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA / Jorge
Tomás Trovó Echague.
83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2018.
"Orientação: Maximilian Fries".

1. Geotécnica. 2. Barragem de terra. 3. Geofísica.
I. Título.

JORGE TOMÁS TROVÓ ECHAGUE

ESTUDO DE UMA BARRAGEM DE TERRA COM ÊNFASE NA ANÁLISE
ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

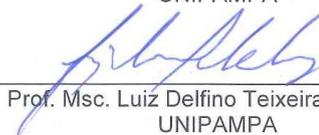
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 13 de dezembro de 2018.

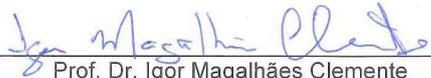
Banca examinadora:



Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Msc. Luiz Delfino Teixeira Albarnaz
UNIPAMPA



Prof. Dr. Igor Magalhães Clemente
UNIPAMPA

Aos meus pais,
Maria Margarida e Javier, e meus avós
Lúcia Maria e Luiz Armando, além de todos
que acreditam e torcem por mim.

RESUMO

Barragens são estruturas que retêm as águas de cursos d'água para diferentes finalidades. Em resposta as elevadas quantidades de água confinadas, são exigidas estruturas proporcionalmente resistentes. Entretanto, sabe-se que as barragens de construção mais simplificadas, como as barragens de terra, são frequentemente utilizadas, apesar de, apresentarem características estruturais passíveis de falhas. O objetivo principal deste trabalho consiste na aplicação de métodos diretos e indiretos de investigação em uma barragem de terra, examinando a correlação dos dados geotécnicos e geofísicos, de modo que subsidiem a avaliação da integridade e estruturas da mesma. A área de estudo situa-se na cidade de Uruguaiana, extremo oeste do estado do Rio Grande do Sul. A aplicação do método direto de análise como o mapeamento geológico e pedológico sucinto na área permitiu a interpretação das rochas/solos de fundação e dos materiais de construção. Análises computacionais de permeabilidade dos solos e estabilidade de taludes, propiciaram a caracterização dos parâmetros geotécnicos intrínsecos às barragens, os quais foram integrados à investigação indireta por meio da geofísica, método da eletrorresistividade. O imageamento elétrico possibilitou a detecção de infiltrações de água no corpo da barragem a partir das variações de resistividade elétrica do meio complementando os dados geológicos e geotécnicos da barragem auxiliando na interpretação dos riscos associados a barragem e suas adjacências. A associação dos dados obtidos pelos métodos demonstrou ser uma ferramenta de monitoramento muito eficaz e pouco onerosa em projetos de barragens de terra, nas quais a correlação entre os métodos utilizados contribuiu para uma avaliação de monitoramento otimizada e mais realista quanto aos problemas de segurança, favorecendo assim, a constatação da estabilidade estrutural e interna provada na barragem de estudo.

Palavras-Chave: geotécnica, barragem de terra, geofísica.

ABSTRACT

Dams are structures that retain the waters of watercourses for different purposes. In response to the high amounts of confined water, proportionately sturdy structures are required. However, it is known that more simplified construction dams, such as earth dams, are often used, although they have structural characteristics that can be faulted. The main objective of this work is the application of direct and indirect methods of investigation in an earth dam, examining the correlation of the geotechnical and geophysical data, in order to subsidize the evaluation of the integrity and structures of the same. The study area is located in the city of Uruguaiana, extreme west of the state of Rio Grande do Sul. The application of the direct method of analysis such as the geological and pedological mapping in the area allowed the interpretation of the foundation rocks and soils of construction. Computational analyzes of soil permeability and slope stability allowed the characterization of the geotechnical parameters intrinsic to the dams, which were integrated to the indirect investigation through the geophysics, method of electroresistance. The electrical imaging enabled the detection of water infiltrations in the dam body from the electrical resistivity variations of the medium complementing the geological and geotechnical data of the dam, aiding in the interpretation of the risks associated to the dam and its surroundings. The association of the data obtained by the methods proved to be a very effective and inexpensive monitoring tool for earth dam projects, in which the correlation between the methods contributed to an optimized and more realistic monitoring assessment of safety problems, thus favoring, a finding of proven structural and international stability in the study dam.

Keywords: geotechnical, earth dam, geophysics.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por as oportunidades a mim presenteadas até este momento. Aos meus pais, pelas lições, pelo amor e apoio desde o momento que me entendo por gente. Agradeço todos os dias, pelo sacrifício de vocês em tornarem dos meus objetivos os seus também. Investindo na minha educação de uma maneira que jamais poderei mensurar, com intuito de torna-la a mais qualificada possível. Ser filho de vocês é ser aquela peça rara privilegiada que o Vô Barbudo sempre fala e que só entendi agora o contexto de valor na frase, pois detenho as características, mesmo que minuciosas, da grandeza do brilho de vocês! Caião, Fred, Celso, Vô Luiz, Vô Lucinha e Vô Telma, obrigado pela sinergia e pelas palavras que precisei ouvir, vocês são fundamentais em cada passo da minha vida, mesmo que de longe!

À minha namorada Rhaíssa, meu braço direito, detentora da personalidade mais forte que conheço, além da paciência em meio ao caos cotidiano. Pela amizade, carinho e amor desde o momento que nos conhecemos. Obrigada por me aguentar e me fazer bem como ninguém!

Aos amigos, de Mococa, Gabriel (El), Lucas (Lukinha), Eduardo (Du), Diego (Dieguin), André (Dé), Marco Aurélio (Markim) e todos os outros que necessitariam ser citados aqui também, mas que não caberia devido espaço limitado que tenho. Aos amigos conquistados em Caçapava do Sul, desde o senhorzinho (Tio Walter), funcionários da Universidade, até o pessoal do trabalho na Lancheria Aquarela por aguentarem os meus dias difíceis e ensinarem o que realmente levamos da jornada desse plano. Aos amigos geólogos, por todo o apoio, amizade e confiança depositados nos trabalhos e campos juntos, sem vocês nada disso seria possível. Um agradecimento especial para os amigos Plínio (Neto), Giovanni (Gio), Bruno (Brutera), Yuri, Eduarda (Duda), Isadora, Alisson, Francesco, Cauê, Fabiano, Bruno (Canis), Rodrigo (Guigo), Juliana (Ju), Guilherme (Zoio), Camila, Jorge e Pablo (Pablito).

Aos meus orientadores, Dr. Maximilian Fries, Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas e Dra. Cristiane Heredia Gomes pelos ensinamentos, parceria, confiança e respeito.

Ao geofísico Lenon Melo Ilha, geólogo Marcelo Lusa e Motorista Beto, pela disponibilidade de sempre, em campos, conversas e experiências compartilhadas. Além de todos os funcionários da empresa Calcário Andrezza Ltda, pela oportunidade de estagiar ao lado de vocês! Agradeço também a todos os professores que tive desde o colégio Castelo em Mococa até à faculdade.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de situação e localização da área.	18
Figura 2 - Mapa geológico regional.	20
Figura 3 - Barragem de terra homogênea simples sem a utilização de drenagem. ..	23
Figura 4 - Barragem de terra homogênea simples, com corpo heterogêneo, utilizando um dreno de pé coberto por areia grosseira e cascalho.	23
Figura 5 - Modelo representativo da utilização de material grosseiro na proteção do talude.	23
Figura 6 - Barragem de terra zonada em corte.	24
Figura 7 - Gráfico de variação do coeficiente de permeabilidade do solo em função do teor de umidade de compactação.	29
Figura 8 - Estruturas de solos compactados.	30
Figura 9 - Esquema dos principais métodos geofísicos aplicados na investigação geológica.	31
Figura 10 - Métodos geofísicos de prospecção, com enfoque para os métodos geoeletricos.	32
Figura 11 - Representação esquemática do método da eletrorresistividade. A e B sendo os pontos de aplicação da corrente elétrica (I) no terreno; M e N, posições de análise do potencial criado (ΔV).	35
Figura 12 - Esquema de caminhamento elétrico utilizado no arranjo Dipolo-Dipolo.	37
Figura 13 - Configuração dos eletrodos no arranjo Wenner-Schlumberger em (i), padrão de dados de pseudo-seção para os arranjos de (ii) Wenner, (iii) Wenner-Schlumberger.	38
Figura 14 - Diferentes formas de superfície de deslizamento ao longo do talude.	40
Figura 15 - Distribuição de forças de atuação no método das Lamelas.	42
Figura 16 - Distribuição de forças em uma fatia de solo, método de Bishop.	44
Figura 17 - Distribuição de forças em uma fatia de solo, método de Janbu.	45
Figura 18 - Notação estrutural tipo dip direction com bússola. a) direção do ângulo de mergulho do plano (dip); b) e c) direção do mergulho do plano (dip).	47
Figura 19 - Localização da barragem e perfis de eletrorresistividade no campus da Unipampa-Uruguaiana.	48
Figura 20 - Composição de imagens dos materiais utilizados no caminhamento elétrico: A) Distribuição dos cabos, eletrodos e resistímetro no perfil mais próximo ao talude de jusante da barragem (Perfil 2); B) Distribuição dos equipamentos no perfil mais próximo ao talude de montante e C) Unidade de medida e aquisição de dados (resistímetro).	49
Figura 21 - Composição de imagens das características geométricas/estruturais analisadas de acordo com o checklist de inspeção regular de barragens: A) Extensão do talude de jusante, com grande presença de vegetação em sua estrutura; B) Vertedouro em concreto e; C) Extensão do talude de montante.	51
Figura 22 - Mapa de localização dos afloramentos estudados na área.	52
Figura 23 - Composição de imagens das feições geológico-pedológicas da área: A) Porção detalhada do afloramento analisado, com destaque para as estruturas vesiculares presentes; B) Amostra do litotipo caracterizado na área, de textura porfírica e assembleia mineralógica determinada por plagioclácios milimétricos e porfiroclastos de piroxênio imersos numa matriz fanerítica muito fina; C) Ampliação do afloramento estudado, contexto adjacente ao vertedouro da barragem, com cerca de 1,20m de altura e marcado pelas estruturas rúpteis, com destaque para duas	

orientações preferenciais (NW-SE/NE-SW); D) Porção detalhada da exposição de solo em talude, com cerca de 60cm de espessura e fragmentos de rocha imersos na matriz argilosa e; E) Extensão do talude observado, localizado adjacente ao reservatório da barragem, dando ênfase no limite entre solo/rocha e posição da porção de detalhe descrita no item D.	53
Figura 24 - Nascente do Arroio Felizardo.....	54
Figura 25 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil1-P1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.....	59
Figura 26 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil1-P1) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.....	60
Figura 27 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil2-P2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.	61
Figura 28 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil2-P2) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.....	62
Figura 29 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil3-P3) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.....	63
Figura 30 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil3-P3) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.....	64
Figura 31 - Composição de imagens das características geométricas e estruturais da barragem: A) Foto panorâmica da região da barragem de terra, com destaque em amarelo para a localização da zona de maior umidade constatada no checklist e em vermelho a bomba d'água presente no reservatório; B) Imagem do talude de jusante e em detalhe as medidas geométricas analisadas no mesmo; C) Condições da zona extravasor da barragem, dando ênfase para sua extensão e a espessura da crista (taipa) da barragem; D) Talude de montante com blocos de basalto utilizados como suporte físico contra as ondas e; E) Zona de umidade no talude de jusante.	66
Figura 32 - Relatório de Sondagem (SPT).	67
Figura 33 - Terminologia usualmente adotada para definir as geometrias do talude.	71
Figura 34 - Geometria da barragem de terra estudada.	71
Figura 35 - Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado a barragem pelo método de Bishop.	72
Figura 36 - Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado a barragem pelo método de Janbu.....	73
Figura 37 - Especificações do Fator de Segurança.....	73
Figura 38 - Gráfico de velocidade de vazão vs largura da barragem.....	75
Figura 39 - Modelo de fluxo de água no solo e corpo da barragem.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistividade média para diferentes rochas e minerais.	34
Tabela 2 - Correlação entre N_{spt} e o ângulo de atrito interno Φ	66
Tabela 3 - Correlação entre N_{spt} e o peso específico do solo.	70
Tabela 4 - Descrição dos materiais para o SEEP/W.	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos gerais.....	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. JUSTIFICATIVA	16
4. ÁREA DE ESTUDO	17
4.1 Contexto Geomorfológico, Hidrográfico, Climático e Pedológico da área	18
4.2 Geologia Regional.....	19
4.3 Geologia Local	20
5. REVISÃO BILIOGRÁFICA	21
5.1 Barragens.....	21
5.2 Barragem de Terra	21
5.2.1 Barragem de terra homogênea	22
5.2.2 Barragem de terra zonada.....	24
5.3 Percolação de água no solo	25
5.3.1 Controle da percolação de água no solo	26
5.4 Parâmetros para projeto e análises de barragens de terra	26
5.4.1 Coeficiente de permeabilidade	27
5.4.2 Permeabilidade do solo e a compactação.....	28
5.5 Geofísica	30
5.5.1 Geofísica aplicada à geologia de engenharia.....	32
5.5.2 Eletroresistividade	33
5.5.2.1 <i>Materiais e respostas de eletroresistividade</i>	34
5.5.3 Arranjos e técnicas de aquisição.....	35
5.5.3.1 <i>Dipolo-Dipolo</i>	36
5.5.3.2 <i>Wenner-Schlumberger</i>	37
5.6 Estabilidade de taludes	38
5.6.1 Linha potencial de ruptura	39
5.6.2 Métodos de análise de estabilidade de taludes.....	40
5.6.2.1 <i>Método de Bishop</i>	43
5.6.2.2 <i>Método de Janbu</i>	44
6. MATERIAIS E MÉTODOS	46
6.1 Atividades de laboratório	46
6.2 Atividades de campo	46
6.2.1 Caracterização geológica/estrutural/pedológica na área.....	46
6.2.2 Aquisição geofísica de eletroresistividade.....	47
6.2.3 Determinação de parâmetros geotécnicos (permeabilidade, porosidade, estabilidade estrutural do talude da barragem).	49
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
7.1 Análise Geológica-Estrutural, Pedológica e Hidrográfica	51
7.2 Análise Geofísica	54
7.3 Análise Geotécnica	65
7.3.1 Parâmetros geotécnicos.....	65

7.3.2 <i>Cheklis</i> t de Inspeção das Estruturas	65
7.3.3 Dados de Sondagem de Simples Reconhecimento	67
7.3.4 Parâmetros de projeto	65
7.3.5 Referências para projeto	70
7.3.6 Análise da estabilidade de talude	70
7.3.6.1 <i>Geometria do Talude</i>	71
7.3.6.2 <i>Determinação do fator de segurança</i>	72
7.3.7 Condições de Permeabilidade da Barragem	73
7.3.7.1 <i>Gradiente Hidráulico</i>	74
7.3.7.2 <i>Fluxo de água</i>	75
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1. INTRODUÇÃO

A geologia de engenharia dispõe de inúmeras aplicações dentre os projetos de engenharia. Do qual, uma das utilidades mais consolidadas, dizem respeito ao estudo e construção de barragens.

Desde os primórdios da humanidade, as barragens de terra foram construídas com intuito de garantir o armazenamento de água das populações, tanto para necessidades individuais quanto coletivas. Algumas destas construções apresentavam dimensões consideráveis, como uma construída no Egito com cerca de 12m de altura e 6,8 mil anos (MASSAD, 2010). Com o passar dos anos, as barragens adquiriram uma importância econômica e ambiental, em maior proporção na geração de energia elétrica, irrigação, piscicultura, entre outras aplicações.

Entretanto, em função da simplicidade na construção de alguma destas obras, tais como barragens de terra homogênea, ao contrário das obras de maior porte normalmente de concreto, resultam de obras irregulares, geralmente, desprovidas de embasamento teórico-científico, fundamentando-se apenas em conhecimentos mais empíricos. Conseqüentemente, diversos parâmetros que necessitariam ser considerados desde a etapa de projeto até o encerramento da vida útil da barragem, tais como a permeabilidade do solo, granulometria, capacidade de percolação da água ao longo da estrutura, dentre outros, não são analisados. Essa desconsideração pode aumentar o custo de projeto, em função do exagerado uso de material, e até mesmo, delimitar a construção da barragem com dimensões inferiores as de segurança, diante do risco de provocar grandes danos econômicos e ambientais.

No estudo de barragens são utilizadas análises diretas e indiretas de investigação, com finalidade de determinar os cenários mais adequados para implantação e monitoramento dessas obras.

Os métodos diretos de estudo e monitoramento das condições geológico-geotécnicas incluem uma série de procedimentos, tais como, classificação litológica e estrutural das rochas do contexto da barragem, análises visuais e geométricas das estruturas do corpo do barramento, tais procedimentos visam quantificar e qualificar as condições de segurança intrínsecas da barragem, além de atribuir as características mensuradas para a geração de modelos computacionais que simulem os processos de percolação de água no interior do corpo do barramento e estabilidade

de taludes, de acordo com os dois métodos Bishop e Jambu, em função das características físicas e mecânicas.

Os métodos indiretos de estudo geológico abrangem uma gama de ensaios geofísicos. Um ensaio que vem sendo bastante empregado para os casos de barramento de terra, portando com contrastes de propriedades físicas mensuráveis, é o levantamento geofísico, no qual, o método mais utilizado é a eletrorresistividade. Assim, os parâmetros que provocam a ruptura da barragem, como o fluxo de água no barramento ou no substrato rochoso, geram um contraste de propriedades físicas perceptíveis.

O trabalho terá apoio do Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Caçapava do Sul, que fornecerá os equipamentos para realização dos métodos indiretos de investigação.

Portanto, com finalidade de caracterizar a vulnerabilidade aos riscos atrelados as barragens de terra, através dos ensaios geotécnicos citados anteriormente e do levantamento eletrorresistivo, como ferramenta de monitoramento, este trabalho propõe o estudo geológico-geotécnico em uma barragem de terra localizada dentro do campus da UNIPAMPA em Uruguaiana (RS). Tal trabalho pretende ainda colaborar para a avaliação da eficácia do uso de uma técnica indireta de investigação e monitoramento, em conjunto com as análises geotécnicas convencionais, elaborando dados mais representativos acerca dos problemas de segurança desenvolvidos na barragem.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Identificar os principais problemas relacionados à segurança das estruturas da barragem de terra da Universidade Federal do Pampa, campus Uruguaiana, considerando análises geológicas, geotécnicas e geofísicas.

2.2 Objetivos específicos

A aplicação das análises geológico-geotécnicas e geofísicos utilizados no estudo da barragem de terra, sintetizadas em:

- a) Reconhecer o contexto litológico-estrutural e pedológico;
- b) Obter os dados geotécnicos do *checklist* da inspeção na barragem;
- c) Realizar análises geofísicas de eletrorresistividade para obtenção de dados do corpo da barragem;
- d) Realizar análises de permeabilidade do solo e estabilidade dos taludes através de ferramentas computacionais;
- e) Correlacionar os dados geotécnicos e geofísicos que subsidiem a atual situação da barragem.

3. JUSTIFICATIVA

A caracterização geotécnica de barragens, tanto na fase de projeto, como no monitoramento da utilização das mesmas, é uma das exigências essenciais para a projeção de sua vida útil, pois, define os parâmetros que, muitas vezes, se influenciam mutuamente, potencializando ou diminuindo os riscos associados. Portanto, se faz necessário obter um conhecimento prévio do contexto geológico da área da barragem, a fim de estabelecer a escolha mais adequada dos métodos investigativos que irão ser utilizados. Sendo estes últimos, os procedimentos que definiram os fatores de segurança associados a vulnerabilidades das obras, quanto aos riscos sócio-econômicos e ambientais, decorrentes dos acidentes em barragens.

Os métodos geofísicos, apesar de eventualmente serem susceptíveis a ambiguidades e dúvidas de interpretação, disponibilizam uma forma rápida e econômica de se adquirir informações geológicas de subsuperfície. Os ensaios geofísicos integrados a métodos geotécnicos diretos, gera informações mais acuradas fornecendo importantes subsídios em profundidade sobre a área investigada.

Neste cenário, o estudo tem o propósito de associar ambos os métodos no ramo da geotecnia, servindo no auxílio a empresas deste ramo otimizando a segurança em barragens de terra de forma eficaz e pouco onerosa.

A barragem proposta neste estudo, foi construída há aproximadamente 20 anos ainda na gestão da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), com o propósito de incrementar atividades de pesquisa do curso tecnológico em aquicultura e agronomia. Tendo como principal função reter o fluxo da drenagem do arroio Felizardo. Foi construída empregando apenas um tipo de solo do local. Possui cerca de 13,5 metros de comprimento de talude de montante a talude de jusante, 3

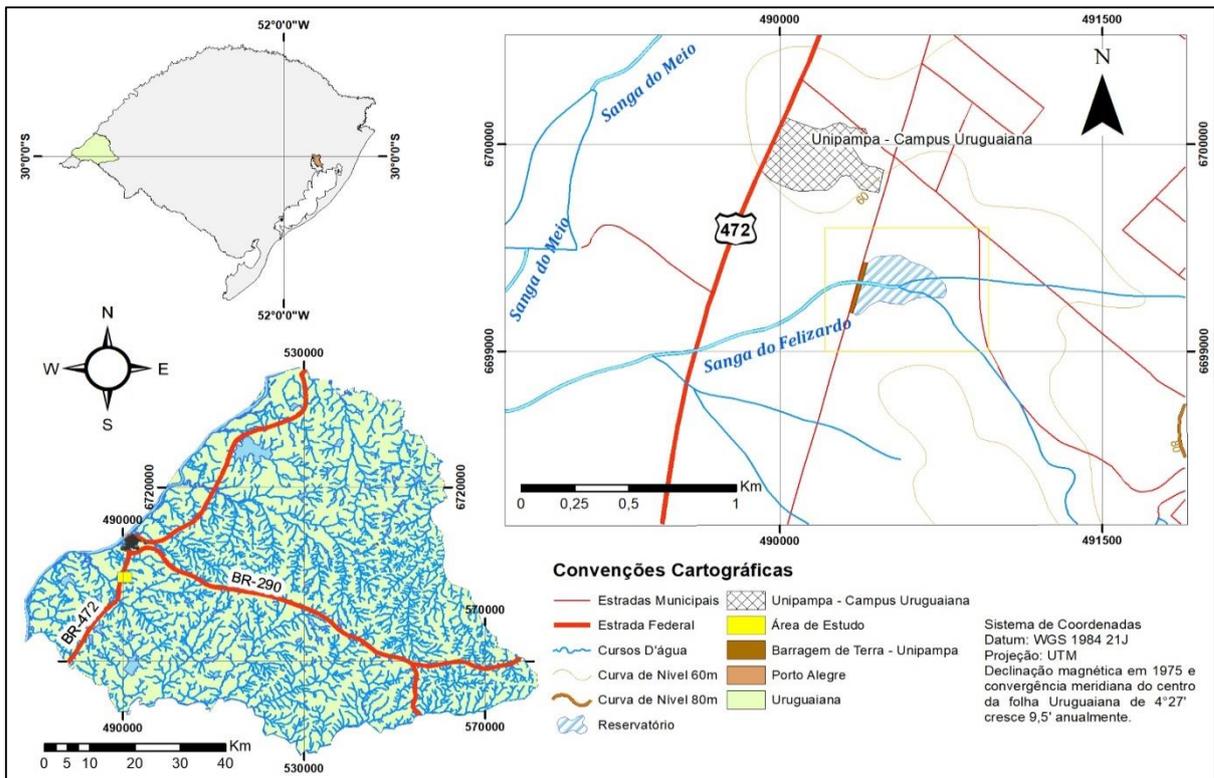
metros de altura, aproximadamente 3 hectares de reservatório de água doce, largura de crista de 4 metros, no qual estende-se transversalmente ao reservatório por cerca de 360m. Considerando o tempo e a simplicidade de construção, tais matérias podem ao longo do tempo sofrer infiltrações (interporos) causando erosão interna *pipping* com consequentes cavidades podendo acarretar em colapso.

Considerando estas características acima citadas, para a etapa de aquisição dos parâmetros geológicos e, geotécnicos, propõe-se a realização de análises *in loco* conjuntamente com uma aquisição geofísica. A Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Uruguaiana, levando em conta a necessidade de integridade da construção e da viabilidade da metodologia proposta, concedeu a possibilidade de se realizar o estudo prático.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste em uma barragem localizada na Universidade Federal do Pampa, campus Uruguaiana, BR 472 – Km 585. Situa-se a 1 km do centro urbano do município e cerca de 600 km a oeste de Porto Alegre, capital do estado. O acesso se dá a partir da BR 472 (Figura 1) e a barragem encontra-se próxima as dependências dos tanques de estabilização utilizados para projetos de piscicultura do campus Uruguaiana.

Figura 1 - Mapa de situação e localização da área.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

4.1 Contexto Geomorfológico, Hidrográfico, Climático e Pedológico da área

O contexto geomorfológico da área se insere no Planalto da Campanha. A morfologia é generalizadamente plana, subhorizontalizada que caracteriza a unidade, desenvolvida em rochas efusivas da Formação Serra Geral e, secundariamente, em arenitos da Formação Botucatu. Geomorfológicamente, é comum a ocorrência de um relevo de aplanamento retocado desnudado nas áreas interfluviais identificadas como coxilhas e uma ampla superfície de aplanamento em situações topográficas superiores que descem em rampas em direção aos extensos terraços fluviais do Rio Uruguai (IBGE, 2003).

O cenário hidrográfico da região é determinado por dois conjuntos hidrográficos do Estado, a bacia do rio Quaraí e a bacia do rio Ibicuí, ambas pertencentes à Região Hidrográfica do rio Uruguai. O interflúvio, conhecido como Coxilha de Santana, presente na área central do município, onde as altitudes são da ordem de 100 a 200m, dividem o escoamento da hidrografia, e configura uma drenagem que escoar de

nordeste a sudoeste (bacia do Quaraí) e no sentido leste-noroeste (bacia do Ibicuí), com padrão dendrítico.

Os cursos fluviais da bacia do rio Quaraí, cujo regime é permanente e com vazão média de 193,20(m³/s), correspondem as sub-bacias dos arroios Capivari, Guapitangi, Caiboaté, Camoatim, e Garupa, bem como da Sanga do Junco e da Sanga dos Umbus, todos afluentes do rio Quaraí, em sua margem direita. A bacia do rio Ibicuí, com maior expressividade no município e com foz no rio Uruguai, tem como principais cursos fluviais de regime permanente e vazão média de 477,18(m³/s), correspondem as sub-bacias dos arroios Guarapuitam, Itapitocai, do Salso, Riacho, Touro Passo, Sanchuri. Puitã, Ipane, São Gonçalo, Guaviju, Ijiquiqua, Ibiricaizinho, a Sanga do Jacaré são aqueles com foz no rio Ibicuí (PMSB, 2005). De maneira local, o contexto fluvial é determinado pela presença da nascente do Arroio Felizardo, responsável pelo fluxo de água até o reservatório da barragem e que faz foz com o Arroio Itapitocai, que por sua vez desemboca no Rio Uruguai.

O Clima é caracterizada como subtropical, com verões quentes. A média anual das precipitações pluviométricas varia entre 1300 e 1500 mm; as chuvas, em geral, são bem distribuídas ao longo do ano, apresentando índices médios mensais superiores a 100 mm o que não exclui a ocorrência de déficits hídricos nos meses mais quentes (ALMEIDA, 1996).

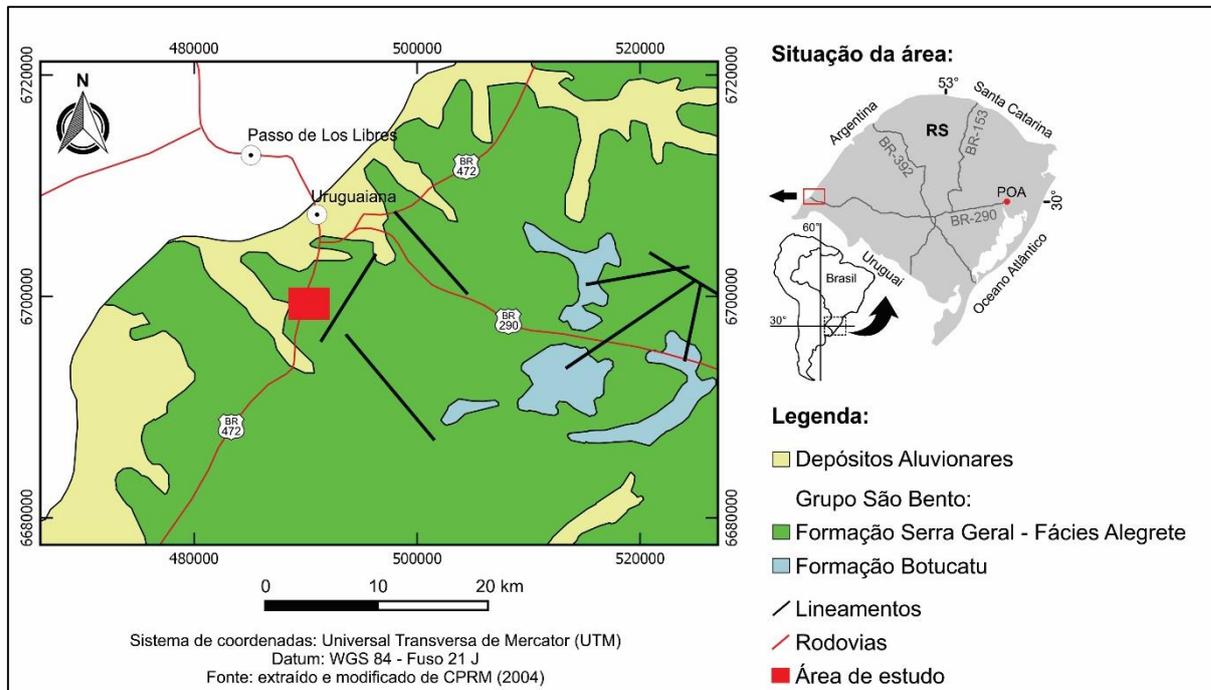
O solo é classificado como Chernossolos Ebânicos do tipo Brunizem Vértico Cálculo, definido por uma textura argilosa a média/argilosa e situado em relevo plano e suave ondulado. Também são classificados como Solos Litólicos eutróficos a chernozêmico, com textura média e substrato basáltico em relevo suave ondulado (IBGE, 2002).

4.2 Geologia Regional

A área proposta situa-se geologicamente na porção centro-oeste do denominado Vulcanismo Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul (Figura 2), o qual pertence ao grupo São Bento e se insere na parte sudoeste brasileira da Província Vulcânica do Paraná. A região na qual está localizado o município de Uruguaiana abarca as associações de basaltos e basalto-andesitos de afinidade toleítica, relacionadas ao Vulcanismo Serra Geral, e recobre rochas

sedimentares da Bacia do Paraná, principalmente de idade mesozóica (MELFI & PICCIRILLO, 1988).

Figura 2 - Mapa geológico regional.



Fonte: Extraído e modificado de CPRM (2004).

4.3 Geologia Local

A formação Serra Geral (local do estudo) na região oeste do estado do Rio Grande do Sul ocupa uma área de cerca de 200 x 200 km (MARTINS *et al.*, 2011). O contexto das rochas vulcânicas do município de Uruguaiana foi incluído em uma das fácies do magmatismo intermediário a félsico, denominada fácies Alegrete (WILDNER *et al.*, 2003).

Esta fácies (Figura 2) encontra-se assentada sobre um derrame basáltico, sendo a rocha vulcânica, porfirítica ou vítrea, constituída principalmente por plagioclásio ou augita. Estes derrames são de composição intermediária a ácida, variando entre andesitos e riodacitos, microgranulares, melanocráticos, aspecto sacaróide, freqüentes estruturas de fluxo e autobrechas no topo e base dos derrames.

Em relação a estratigrafia, a Formação Serra Geral encontra-se acima dos arenitos desérticos da Formação Botucatu (SCHERER, 2002). Localmente, a porção urbanizada do município está sobreposta aos depósitos aluvionares caracterizados

pela presença de areia grossa a fina, cascalho e sedimento siltico-argiloso, em calhas de rio e planícies de inundação.

5. REVISÃO BILIOGRÁFICA

5.1 Barragens

As barragens são definidas como estruturas construídas em vales, transversalmente aos leitos de rio, com finalidades de proporcionar um represamento de água (MELLO, 1963). Os principais objetivos que levam a implantação de uma barragem podem ser: Aproveitamento hidrelétrico, regularização das vazões do curso d'água, abastecimento doméstico e industrial de água, controle de inundações, irrigação, contenção de rejeitos, piscicultura, entre outros motivos.

Os diferentes tipos de barragens são definidos através da finalidade de sua construção, levando em conta os tipos de materiais utilizados, seu programa hidráulico e, sendo assim, em conformidade com Mello (1963), determinados essencialmente pela natureza geotécnica local. São classificadas em:

- Concreto;
- Terra;
- Enrocamento

5.2 Barragem de Terra

O objeto principal deste trabalho é a análise de uma barragem de terra, portanto, este item tratara especificamente deste tópico.

Diz-se que as barragens de terra, constantemente usufruídas desde os tempos antigos, existiam com finalidade de armazenamento de água para irrigação (MARANGON, 2004).

As primeiras obras apresentavam um transporte mais rudimentar e a compactação do material decorria através de animais ou homens. Somente no final do século XIX foram adotados modelos mais desenvolvidos na etapa de construção das barragens, como o enrocamento, consistindo basicamente na inserção de núcleos argila, com a finalidade de assegurar a estanqueidade do projeto (MASSAD, 2010).

De acordo com *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2011), as principais vantagens das barragens de terra são:

- Projetos de implantação mais simples;
- Aproveitamento de materiais de empréstimo locais;

- Menores investimentos;
- Fundações mais simplificadas em virtude da largura das bases;
- São melhores apropriadas para locais onde encontram-se movimentos do solo do que em estruturas mais rígidas.

Por outro lado, as desvantagens são determinadas pela:

- Maior susceptibilidade a danos ou rompimento através da passagem de água;
- Vertedouros de difícil elaboração e projeção;
- Vulnerabilidade em casos de compactação inapropriada;
- Obrigatoriedade da manutenção contínua evitando infiltrações, erosões e danos provenientes de outros motivos.

Sendo assim, barragens de terra são classificadas como obras rudimentares no âmbito das barragens. Sendo determinadas por sua aptidão de uso em diferentes tipos de fundação. Essas obras apresentam uma variabilidade em seu tipo, podendo ser classificadas como homogêneas ou zonadas.

5.2.1 Barragem de terra homogênea

De acordo com Marangon (2004), as barragens de terra homogênea utilizam apenas um único tipo de material de empréstimo para sua construção. Em virtude disso, salienta-se a importância de que os taludes apresentem inclinações suaves, favorecendo um maior controle da estabilidade da barragem. Além disso, carece da utilização de materiais bastante impermeáveis, com intuito de desfavorecer a percolação da água.

Segundo Massad (2010), é a mais empregada no país, devido a disponibilidade do tipo de solo do Brasil e a geomorfologia favorável. Outra característica descrita pelo autor, é de que a implementação destas barragens é beneficiada por suportar sua construção em solos mais moles, visto que possibilitam fundações mais deformáveis quando comparadas a barragens de concreto, por exemplo.

É o tipo de barragem sugerida quando o solo do local da barragem fornecer características adequadas quanto a impermeabilização e sua construção. A fim de sanar os possíveis problemas (deslizamento de talude, infiltração com afloramento de água á jusante) ocasionados pela poropressão e percolação no interior do aterro, sugere-se a utilização de drenos de pé da barragem envolto por material mais

No entanto, a segurança se torna fator primordial em qualquer tipo construção de engenharia, considerando a dependência dessa frente as probabilidades de danos individuais e coletivos. Não diferente disso, nas barragens de terra a segurança necessita ser ponderada pelos problemas citados por Massad (2010) como:

- Ao transbordamento, que pode abrir brecha no corpo de barragens de terra e enrocamento;
- Ao *piping* e ao fenômeno de areia movediça;
- À ruptura dos taludes artificiais, de montante e de jusante, e aos taludes naturais, das ombreiras adjacentes ao reservatório;
- Ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos, atuantes na superfície dos reservatórios, e que vão se quebrar no talude de montante, podendo provocar sulcos de erosão;
- Ao efeito erosivo das águas das chuvas sobre o talude de jusante.

As condicionantes econômicas abrangem os custos de gerenciamento contínuo durante toda vida da barragem. Com os custos de mão de obra, tipos de equipamentos, legislação do local, entre outros.

5.3 Percolação de água no solo

Conforme Meirelles (2013), a percolação ou infiltração é o curso contínuo da água a partir da face de montante em direção a sua face de jusante. Esse movimento é afetado pelo grau de compactidade do solo, da textura, do grau de saturação, da estrutura e da temperatura da água, que influencia a sua viscosidade.

O discernimento apropriado em relação ao fenômeno de fluxo de água no solo e das tensões provocadas por ela é de extrema importância, tendo em vista, sua responsabilidade por um grande número de problemas práticos das barragens. Segundo Assis (2003), essas adversidades podem ser agrupadas em três principais grupos:

- *Piping* - ou erosão regressiva - pode ocorrer pela migração de partículas de solo devido às forças de percolação, desenvolvendo na fundação ou no maciço da barragem canais ou tubos que se interligam com o reservatório.

- Saturação e instabilização de taludes - causadas pelas forças de percolação devido a fluxos emergentes no talude ou altas subpressões de fundação no pé das barragens.
- Perda excessiva de água - Principalmente em reservatórios alimentados por rios de pequena vazão, estes problemas podem assumir serias proporções.

Portanto, afirma-se conforme FAO (2011) que a percolação é sempre um problema iminente que deverá ser considerado pelo profissional projetista. Interpretando segundo Assis (2003), as características de permeabilidade dos meios, heterogeneidade dos solos, as descontinuidades do maciço, entre outras.

De acordo com Strufaldi (2004), usualmente, os ensaios de percolação são realizados durante a fase de projeto, a fim de se determinar uma estimativa do nível de pressões neutras que o maciço e a fundação estarão submetidos e também em situações atípicas de rebaixamento rápido do nível do reservatório ou fases de pluviosidades significativas. Dessa forma, através das condições estabelecidas, o nível de segurança da barragem é conhecido, favorecendo a realização de possíveis operações em situações de risco.

5.3.1 Controle da percolação de água no solo

Para sanar as implicações que o fluxo de água no solo pode acarretar nas barragens, desenvolveu-se diferentes projetos estruturais de mitigação, cada um com suas características distintas, tornando-os mais ou menos eficiente comparativamente, de acordo com a situação de projeto.

As estruturas criadas, exercem algumas funções essenciais, tais como: redução da percolação, redirecionamento de fluxo, contenção dos gradientes de saída, diminuição da subpressão na fundação e redução da linha de saturação no espaldar de jusante. Assis (2003) existem basicamente dois tipos de soluções:

- Soluções de Drenagem (à montante): Filtros inclinados ou verticais, filtros drenos horizontais, poços de alívio, trincheiras de drenagem.
- Soluções de Impermeabilização (à jusante): Tapetes impermeáveis, trincheiras de vedação diafragmas plásticos, paredes diafragma, cortinas de injeção.

5.4 Parâmetros para projeto e análises de barragens de terra

5.4.1 Coeficiente de permeabilidade

O simples movimento no qual a água realiza através de um material é determinado pela característica do mesmo. Esta, denominada condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (k).

De acordo com Braga (2010) o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica é proporcionalmente contrário às dificuldades que um meio possibilita para o fluxo de um fluido, em virtude, de um gradiente hidráulico.

Segundo Lambe (1958) a composição mineralógica, o grau de saturação e o índice de vazios do meio poroso, as características do fluido e a estrutura do solo, correspondem aos principais aspectos que influenciam na permeabilidade, sendo a estrutura, o fator predominante.

A determinação do coeficiente de permeabilidade é feita considerando-se a Lei de Darcy (1856), conforme a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. Em solos saturados a lei é expressa na equação (1):

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Na qual:

Q = vazão percolada;

K = coeficiente de permeabilidade;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção transversal à direção do fluxo.

O gradiente hidráulico é dado pela equação (2):

$$I = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

Na qual:

ΔH = carga hidráulica dissipada na percolação;

L = distância ao longo do qual a carga é dissipada.

O coeficiente de permeabilidade é diferente conforme o fluido de percolação, como corresponde na equação (3). O coeficiente de permeabilidade de um solo

usualmente é atribuído ao peso específico e a viscosidade da água à temperatura de 20°C.

$$K = \frac{k \cdot \gamma}{\mu} \quad (3)$$

Na qual:

k = permeabilidade intrínseca;

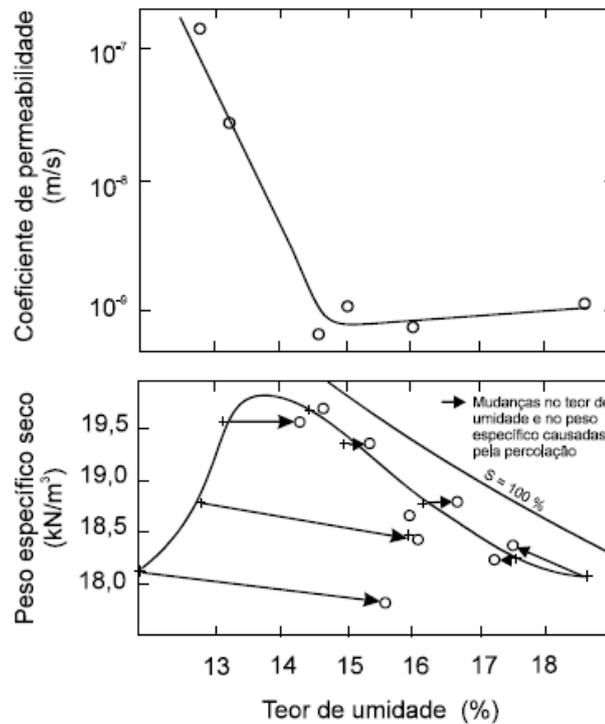
γ = peso específico do fluido;

μ = viscosidade dinâmica do fluido.

5.4.2 Permeabilidade do solo e a compactação

A condutividade hidráulica ou a permeabilidade do solo compactado pode ser representada pelo comportamento da curva de compactação, correlacionando uma determinada energia de compactação e diferentes valores de teor de umidade, de acordo com a figura 7. No ramo seco, isto é, abaixo da umidade ótima, a permeabilidade decresce de maneira considerável até o nível de umidade ótima. Após isso, nos teores de umidade do ramo úmido, não se evidencia variações significativas.

Figura 7 - Gráfico de variação do coeficiente de permeabilidade do solo em função do teor de umidade de compactação.

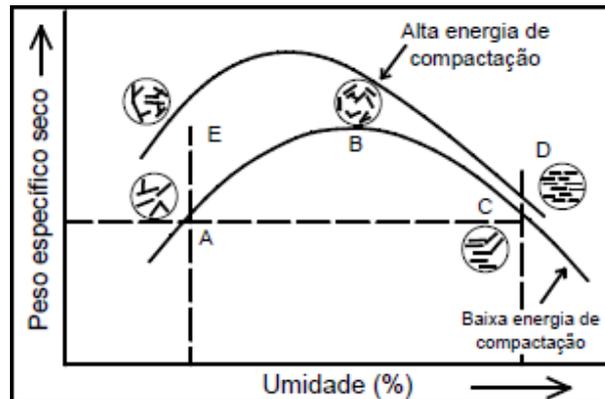


Fonte: Lambe (1958).

Bosco (2008) salienta a visualização de dois pontos, um no ramo seco e outro no ramo úmido, com mesmo peso específico seco, podendo apresentar coeficientes de permeabilidade diferentes. Sendo essa diferença provocada em razão da estrutura do solo compactado.

De acordo com Lambe (1958) a estrutura do solo compactado é explicada com base nas partículas de argila individualizadas. No ramo seco a estrutura é floculada, a orientação das partículas de argilas é aleatória, os vazios são maiores, o caminho de percolação na direção vertical é menor e a permeabilidade é maior. No ramo úmido a estrutura dispersa, as partículas de argila encontram-se em um arranjo paralelo, os vazios são menores, o caminho de percolação é mais tortuoso e a permeabilidade é menor.

Na Figura 8, representa graficamente as estruturas em função destes parâmetros, como sugerido por Lambe (1970).

Figura 8 - Estruturas de solos compactados.

Fonte: Lambe (1970).

De maneira geral, em solos predominantemente argilosos, observa-se estruturas denominadas dispersas (D) e estruturas floculadas (E). Já em solos arenosos e siltosos observa-se um arranjo granular com maior ou menor grau de compactação.

De acordo com Lambe & Whitman (1996), o comportamento de um solo é enormemente influenciado pelo tipo de estrutura existente. Em geral, quando o solo está no estado floculado, ele apresenta maior resistência, menor compressibilidade e maior permeabilidade do que o mesmo solo, no mesmo índice de vazios, porém no estado disperso. Esse comportamento deve-se à maior dificuldade de se impor deslocamentos entre partículas que se encontram em um estado desordenado e à existência de forças de atração entre as partículas. O aumento do teor de umidade tende a reduzir essas forças de atração, permitindo um arranjo mais ordenado.

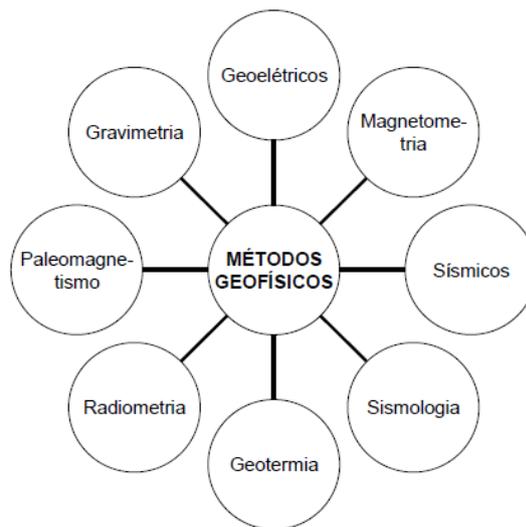
5.5 Geofísica

Estudos que desenvolvem a caracterização a partir de investigação em subsuperfície demandam, na maioria dos casos, tempo de execução e necessidade de diferentes equipes acarretando alto custo nos projetos. Uma alternativa reconhecida é a geofísica que consiste em um método de investigação não invasivo e indireto, obtido por meio de medidas realizadas em função das propriedades físicas apresentadas pelo meio investigado.

As eficiências das respostas adquiridas em levantamentos estão condicionadas aos contrastes significantes do meio medido, que apresentam valores anômalos, no qual expressam as variações laterais e em profundidades existentes nos materiais.

Considerando as propriedades físicas magnéticas, elétricas, eletromagnéticas e elasticidade do meio investigado, são classificados os diferentes métodos de investigação, conforme a Figura 9, que contém resumidamente alguns métodos que se destacam na geofísica aplicada segundo Braga (2006).

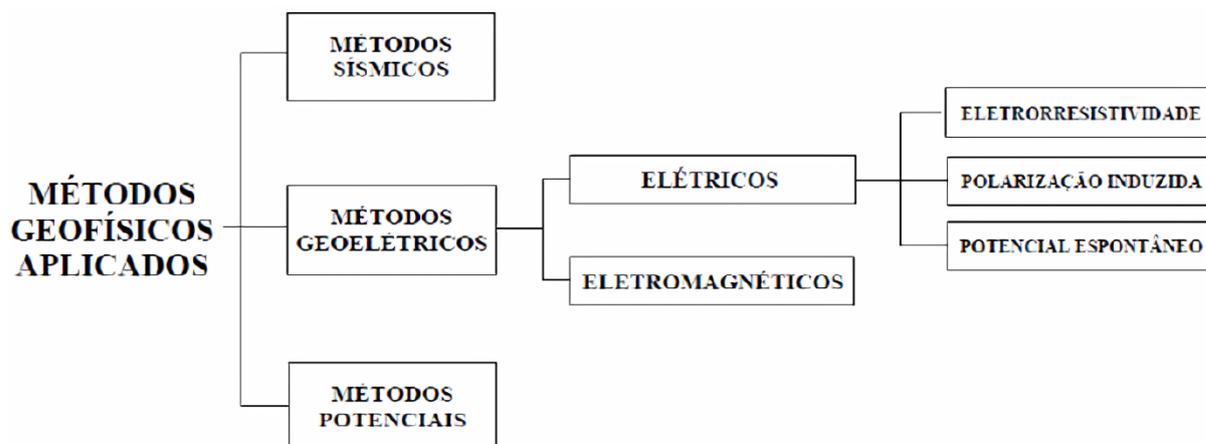
Figura 9 - Esquema dos principais métodos geofísicos aplicados na investigação geológica.



Fonte: Braga (2006).

Considerando-se a classificação de métodos geofísicos aplicados, conforme a propriedade física medida, Gandolfo (2007) apresenta a classificação em métodos Sísmicos, Geoeletricos e Potenciais. Para os métodos geoeletricos, adota-se, a divisão em métodos elétricos e eletromagnéticos, conforme a figura 10.

Figura 10 - Métodos geofísicos de prospecção, com enfoque para os métodos geoeletricos.



Fonte: Gandolfo (2007).

5.5.1 Geofísica aplicada à geologia de engenharia

A geologia de engenharia apresenta um potencial de incluir a aplicação de um método alternativo e não invasivo, como o método geofísico, com intuito de possibilitar solucionar alguns dos problemas inerentes às técnicas mais convencionais de investigação de solo. De acordo com Gandolfo (2012), a utilização dos ensaios geofísicos no âmbito da geotecnia, dispõem ainda da vantagem em fornecer respostas rápidas e abrangentes do volume investigado do subsolo, em seu estado natural, sem influência de procedimentos diretos (sondagens, cavas e trincheiras).

No cenário das barragens, 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.

Segundo Souza *et al.*, (2016), sugere-se 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. Após o processo de instalação da estrutura, o autor complementa que os métodos de eletrorresistividade, potencial espontâneo e georadar (GPR), corroboram no monitoramento do corpo da barragem. Por fim, complementa-se que o método de perfilagem sísmica contínua e batimetria colaboram no monitoramento do processo de acúmulo de resíduos em lagoas de decantação ou no processo de assoreamento de reservatórios de água.

O método de imageamento elétrico de resistividade é capaz de delinear estruturas geológicas importantes em subsuperfície, como falhas, fraturas e descontinuidade. Essas, que por sua vez, determinam o fator responsável pelos vazamentos de água na barragem estudada (WALID, 2014).

Bedrosian *et al.*, (2011) em estudo direcionado a barragem, determinou o contexto estrutural e o caminho da infiltração na área da barragem através de uma combinação de métodos geofísicos, incluindo imageamento elétrico de resistividade, refração e reflexão sísmica, sondagem eletromagnética de domínio do tempo, levantamentos de campo magnético e sondagem magnetotelúrica.

Baseado na realização de um levantamento geofísico integrado, utilizando-se os métodos de resistividade elétrica, método audiomagnetotelúrico com fonte controlada (CSAM), radar de penetração no solo (GPR) e métodos de refração e tomografia sísmica, realizado por Kim *et al.*, (2007), foi possível obter dados através de imagens da estrutura interna do corpo de uma barragem, favorecendo a compreensão do contexto geológico-estrutural e a constatação da influência do material de construção inseridos na obra.

5.5.2 Eletrorresistividade

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. A partir de medições do potencial elétrico na superfície pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas (TELFORD *et al.*, 1990).

Segundo Ward (1990), as propriedades físicas que influenciam na eletrorresistividade, são características dos diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico. São responsáveis por suas características específicas que permitem caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação etc; e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas, tornando mais práticas, rápidas e menos onerosas as pesquisas. Com isso, a resistividade elétrica é um parâmetro particular dos materiais, que se relaciona à dificuldade encontrada por uma corrente elétrica de se propagar em um meio e esse parâmetro depende, entre outras coisas, da natureza e do estado físico do corpo considerado.

5.5.2.1 Materiais e respostas de eletrorresistividade

Em geral, os materiais que apresentam baixa porosidade, por exemplo, rochas ígneas, folhelhos maciços e rochas metamórficas tenderão a manifestar resistividades altas, igualmente o que ocorre com sedimentos secos, como areias e cascalhos ou materiais preenchidos com água (livre de sais dissolvidos). Em contrapartida, sedimentos ou rochas saturadas (com sais dissolvidos), ou com presença de minerais argilosos, tenderão a exibir resistividade intermediárias á baixas, variando de acordo com a quantidade de argilo-minerais (GALLAS, 2000).

Logo, a propagação da corrente elétrica nos diferentes materiais poderá ocorrer através de dois mecanismos de condução: condução eletrônica (através da matriz da rocha), iônica ou eletrolítica (por íons contidos na água, presentes nos poros interconectados, fissuras e/ou fraturas nos materiais rochosos).

Fernandes (1984) complementa que além de água em fraturas e poros das rochas, a presença de minerais condutivos faz baixar o valor da resistividade. No entanto, esta mudança só se faz notar quando a quantidade de minerais condutivos excede 10% do volume da rocha. Alguns valores de resistividade média em diferentes materiais (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de resistividade média para diferentes rochas e minerais.

ROCHA/MINERAIS	RESISTIVIDADE (Ω . m)
Andesito	$1,7 \times 10^2 - 4.5 \times 10^4$
Argilito	10 – 800
Basalto	10 – $1,3 \times 10^7$
Gnaisse	$6,8 \times 10^4 - 3 \times 10^6$
Água doce (20° C)	80
Água subterrânea	0,5 – 300
Solo	1 – 10

Fonte: Extraído e modificado de Telford *et al.* (1990).

A correlação entre os valores de resistividade determinados e a geologia da área de estudo é subjetiva e depende de muitos fatores como teor de água, fraturamento, mineralogia, biota (microorganismos presentes) dentre outros. Desta

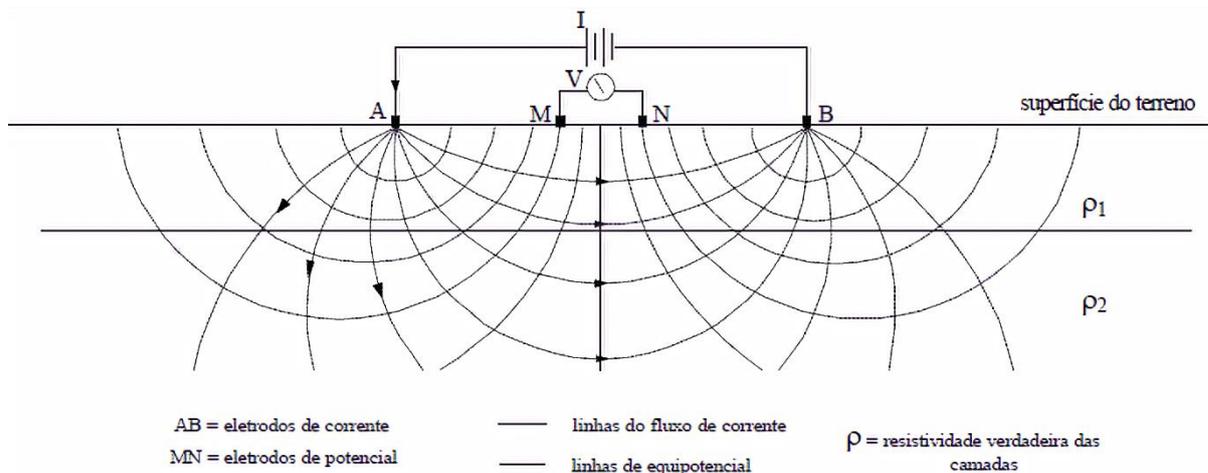
forma faz-se necessário o conhecimento prévio do contexto geológico-estratigráfico local e regional a ser investigado.

5.5.3 Arranjos e técnicas de aquisição

O método geofísico da eletrorresistividade gera, a partir de um instrumento denominado resistímetro, uma fonte artificial de corrente contínua (I) que é introduzida no solo por meio de um par de eletrodos denominados de A e B.

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 11).

Figura 11 - Representação esquemática do método da eletrorresistividade. A e B sendo os pontos de aplicação da corrente elétrica (I) no terreno; M e N, posições de análise do potencial criado (ΔV).



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2011).

Os parâmetros medidos permitem calcular a resistividade aparente (ρ_a) do material investigado (solo ou rocha) em subsuperfície através da equação (4):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \Omega\text{m} \quad (4)$$

Na qual:

K = o fator geométrico relacionado com distribuição (geometria) dos quatro eletrodos A, B, M e N no instante da medida.

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a resistividade representa uma média ponderada de todas resistividades verdadeiras em volume de material relativamente grande em subsuperfície, portanto, efetuam-se cálculos pertinentes para obter uma resistividade aparente, demonstrado na situação anterior (BRAGA, 2006).

A fim de obter-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.

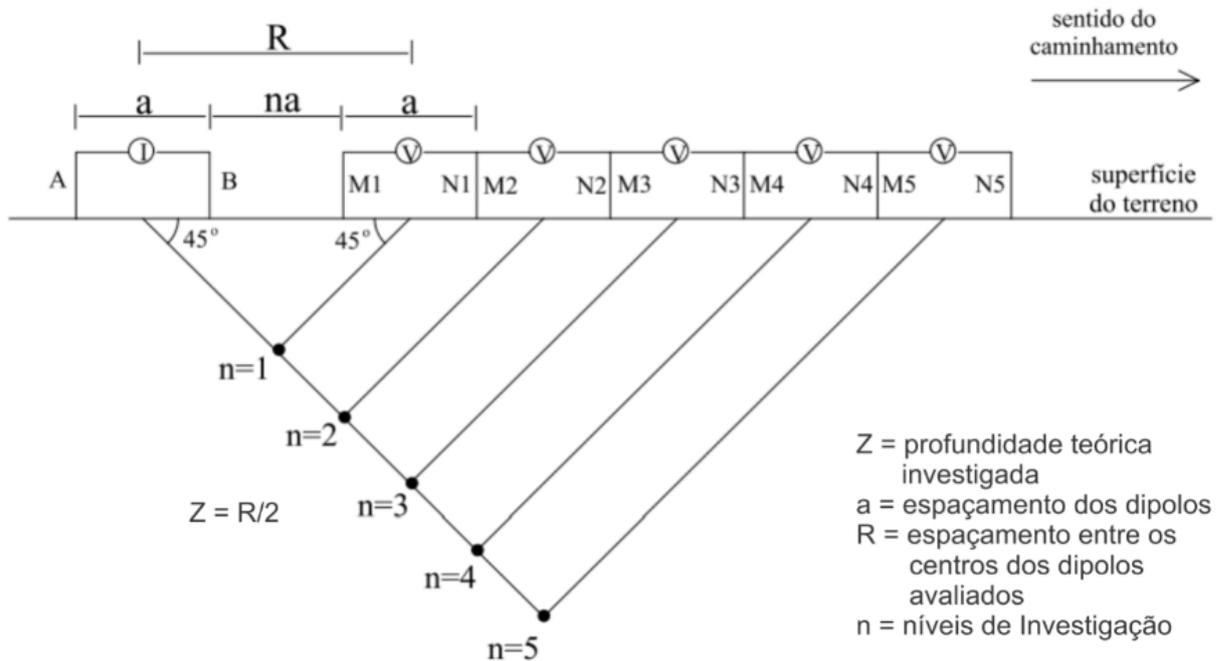
Para a realização deste trabalho é proposto a aplicação dos arranjos Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger. Estes, conseqüentemente, descritos de forma mais detalhada.

5.5.3.1 Dipolo-Dipolo

Um dos arranjos mais utilizados no caminhamento elétrico é o dipolo-dipolo. Neste arranjo, define-se previamente os parâmetros de obtenção dos dados, com espaçamentos iguais entre os eletrodos de recepção (MN) e de injeção (AB), a fim de gerar o deslocamento desejado de uma corrente elétrica no terreno e mensurar o potencial elétrico no centro de ambos os dipolos, obtendo assim, os dados verticais e laterais de subsuperfície (Figura 12).

O alcance vertical de investigação é ampliado de maneira proporcional com o aumento do espaçamento entre os eletrodos, teoricamente igual a $R/2$. (Sharma, 2002). Além das características verticais do arranjo, a grande vantagem da matriz dipolo-dipolo é fornecer uma exposição horizontal longa (Loke, 2000).

Figura 12 - Esquema de caminhamento elétrico utilizado no arranjo Dipolo-Dipolo.



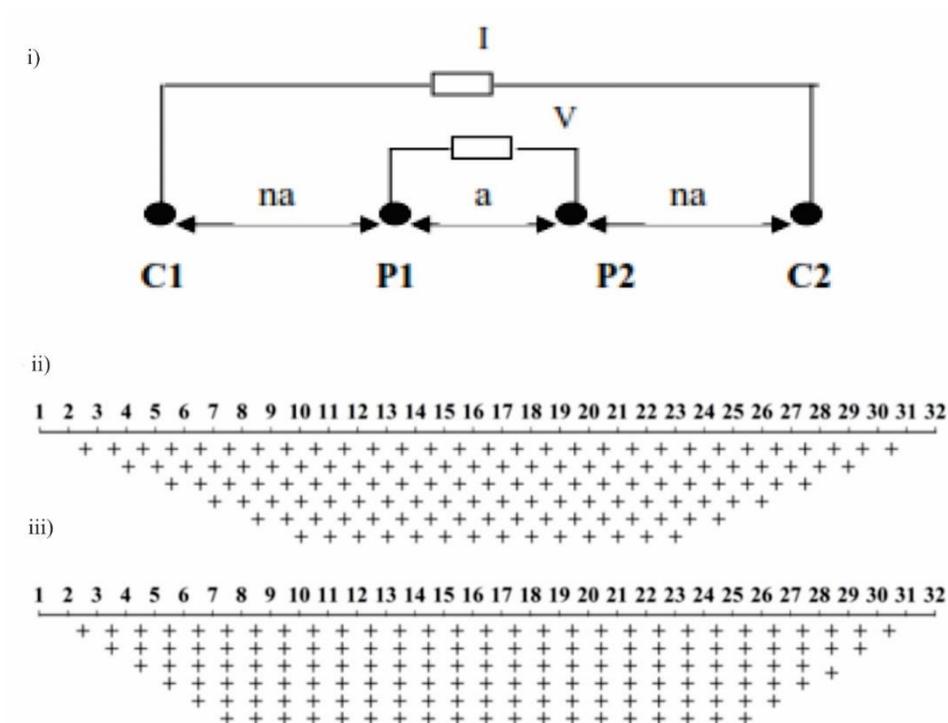
Fonte: Extraído e modificado de GANDOLFO & GALLAS (2007).

5.5.3.2 Wenner-Schlumberger

De acordo com Loke (2000), existe um tipo de arranjo híbrido entre os arranjos Wenner e Schlumberger, combinando dois dos métodos mais utilizados nos levantamentos eletrresistivos, denominado Wenner-Schlumberger.

No arranjo Wenner-Schlumberger (Figura 13), a posição do eletrodo é a mesma do método Wenner, mas a distância (a) entre os eletrodos de corrente (C_1P_1) e de potencial (C_2P_2) é “ n ” vezes a distância entre os dois eletrodos de potencial (P_1P_2). Isso implica a configuração de Wenner-Schlumberger sensível a mudanças na resistividade horizontal e verticalmente. Segundo Loke (2000), em áreas que apresentam condições geológicas complexas, esse método será mais promissor do que a configuração de Wenner e Dipolo-Dipolo. Porém, a abrangência dos dados horizontais é mais estreita comparada com o arranjo Dipolo-Dipolo.

Figura 13 - Configuração dos eletrodos no arranjo Wenner-Schlumberger em (i), padrão de dados de pseudo-seção para os arranjos de (ii) Wenner, (iii) Wenner-Schlumberger.



Fonte: Extraído e modificado de Umar et al. (2018) e Loke (2000).

5.6 Estabilidade de taludes

De acordo com Dyminski (2011) a análise de estabilidade de taludes possui alguns objetivos principais:

- Avaliar a estabilidade de taludes das obras geotécnicas sob diferentes condições de sollicitação ou elaborar projetos de estabilização de taludes já rompidos;
- Avaliar o risco de escorregamento em taludes naturais ou artificiais, por meio de análises de sensibilidade, verificando a influência relativa de determinados parâmetros;
- Retroanálise em escorregamentos já ocorridos, possibilitando o entendimento dos mecanismos de ruptura e da influência de fatores ambientais.

A análise de estabilidade inclui um conjunto de procedimentos visando a determinação de um índice de grandeza que permita quantificar quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra, sob a atuação de um determinado conjunto de condicionantes (pressões neutras, sobrecarga, geometria, etc). (Augusto Filho & Virgili, 1998).

Conseqüentemente, a determinação da análise de estabilidade permite estimar o quão seguro está ou estará um talude. Isso se reflete no cálculo do fator de segurança, que é o menor valor da relação entre a tensão cisalhante resistente do solo e a tensão cisalhante mobilizada pelos esforços atuantes (Equação 5), considerando as prováveis superfícies potenciais de ruptura:

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \quad (5)$$

Na qual:

FS: fator de segurança;

Tres: tensão cisalhante resistente;

Tmob: tensão cisalhante mobilizada.

De acordo com o valor de *FS*, tem-se:

- i. $FS > 1,0 \rightarrow$ obra estável;
- ii. $FS = 1,0 \rightarrow$ ocorre ruptura por escorregamento;
- iii. $FS < 1,0 \rightarrow$ sem significado físico

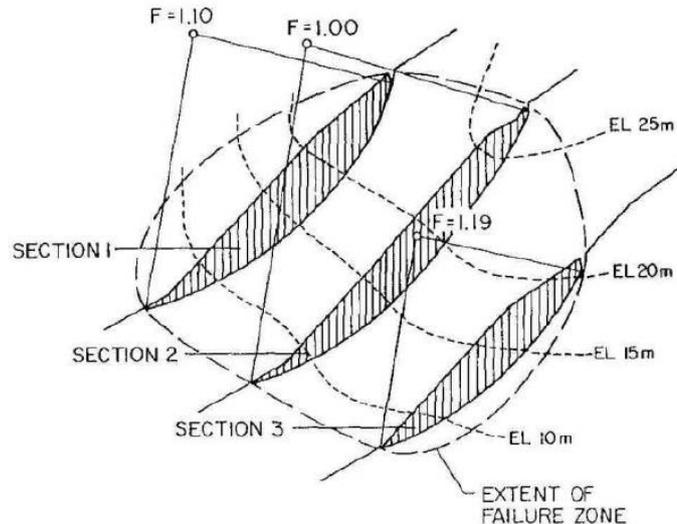
5.6.1 Linha potencial de ruptura

O estudo da linha potencial de ruptura fornece uma base para o que os Métodos de Equilíbrio-Limite procuram, isto é, a definição do fator de segurança que melhor se aproxime das propriedades do talude, juntamente com as características do material que o constituem.

Massad (2010) relata que claramente não se conhece a posição da linha de ruptura "linha crítica", isto é, da linha a qual está associado o coeficiente de segurança mínimo, o que se consegue por tentativas. Atualmente, essa tarefa é facilitada graças aos recursos de computação eletrônica disponíveis.

A forma da linha de ruptura ao longo da extensão do talude poderá ser modificada, considerando que o valor do fator de segurança seja diferente de secção para secção (Figura 14), conforme sugere (GERSCOVICH, 2009).

Figura 14 - Diferentes formas de superfície de deslizamento ao longo do talude.



Fonte: Gerscovich (2009).

Ainda, na análise da estabilidade de uma barragem de terra homogênea, com a presença de características de construção favoráveis (solo argiloso, baixa permeabilidade e fundação consistente), existem três cenários críticos no decorrer da utilização da estrutura (Massad, 2010):

- 1) Analisar a declividade do talude de jusante no final da construção;
- 2) Decorrer do funcionamento da barragem com o fluxo em regime permanente com o reservatório cheio, o talude de jusante é considerado crítico, em função do talude de montante estar submerso.
- 3) Esvaziamento rápido ou rebaixamento rápido do nível do reservatório, correspondendo a uma situação crítica para o talude de montante da barragem, devido à baixa permeabilidade do solo compactado.

5.6.2 Métodos de análise de estabilidade de taludes

Os métodos de análise diferenciam-se pelas hipóteses simplificadoras que cada um imprime, geralmente relacionadas à distribuição interna dos esforços interlamelas.

➤ Método de Equilíbrio-Limite:

Os métodos mais utilizados atualmente são baseados no método de equilíbrio limite, em virtude da experiência acumulada ao longo dos anos, simplicidade de aplicação e sua visão analítica dos problemas. Fora isso, este método leva em conta alguns pressupostos (MASSAD, 2010):

a) O solo se comporta como material rígido plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar;

b) São consideradas equações de equilíbrio estático até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;

c) O fator de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Estes métodos contam com a necessidade de ponderar alguns fatores primários em função de sua influência na estabilidade. Os fatores envolvidos são geologia estrutural, geometria do talude, presença de trincas de tração, fluxo de águas subterrâneas, propriedades de resistência, condições de drenagem ou não drenagem, etc.

Os problemas do método podem ser elencados em:

- 1) Utilização estabelecida somente com uma análise estática: Em função do seu método de análise, não considerando as deformações e distribuição de tensões, não se torna possível obter uma análise realista da situação em grande parte dos casos;
- 2) Tensões uniformemente distribuídas: É necessário importa-se com as concentrações de tensões devidas à forma das estruturas (superfície de falha ou a interação rocha-descontinuidade);
- 3) Simplicidade dos modelos de falhas: Os modelos serão inadequados para processos e mecanismos de falha complexos, particularmente na presença de deformações e deslocamentos progressivos, fluxos, etc.

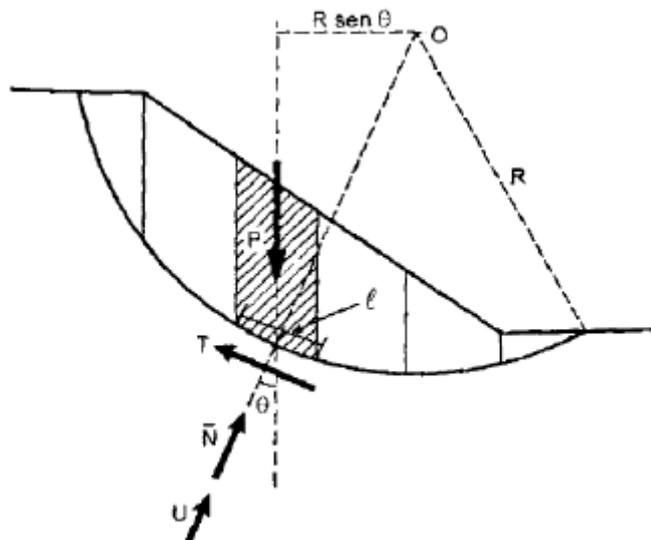
➤ Método Sueco (das “fatias” ou lamelas):

Instituído por Fellenius em 1936 e baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento, sendo este

volume dividido em fatias verticais (FIORI, 2009), as quais são analisadas de maneira individual, como se fosse um único bloco deslizando (Figura 15).

Devidos as fatias não precisarem obter a mesma espessura, a análise de estabilidade através desse método pode ser realizada em taludes de superfície irregular, taludes homogêneos e heterogêneos, aceitando que as divisões das fatias sejam de forma que a base de cada uma permaneça em um determinado tipo de solo, atribuindo-se assim, apenas um conjunto de parâmetros de resistência do solo para cada fatia, para o caso de solos heterogêneos. O Método também abrange a distribuição de poro-pressões. (SILVA, 2013).

Figura 15 - Distribuição de forças de atuação no método das Lamelas.



Fonte: Massad (2010).

De acordo com Massad (2010), O cálculo do fator de segurança adequado para os parâmetros do solo considerado é obtido através da expressão (Equação 6).

$$FS = [\Sigma (c' \cdot l + N \cdot tg\Phi')] / [\Sigma (P \cdot sen\theta)] \quad (6)$$

Na qual:

c' = coesão;

l = largura da lamela, paralela à base;

Φ' = ângulo de resistência ao corte;

P = peso próprio da lamela;

θ = ângulo do centro imaginário do arco até o centro da base da lamela;

u = pressão neutra;

Δx = largura da lamela, paralela ao topo.

A equação 9 é a base para o cálculo do fator de segurança de cada método novo originado. Em que, por meio da combinação desta com as equações de equilíbrio, de acordo com as hipóteses adotadas por cada método, é capaz de obter o fator de segurança para o método considerado.

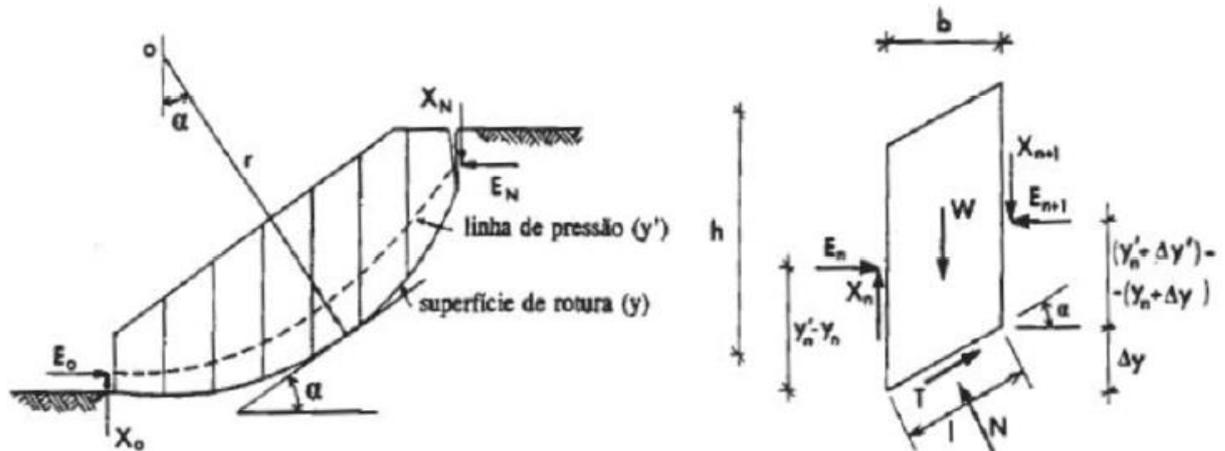
Outros autores que sucederam Fellenius foram, Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Correia (1988), entre outros. Entre estes métodos, os que serão considerados no decorrer do trabalho serão Bishop (1955) e Janbu (1954).

5.6.2.1 Método de Bishop

Proposto por Alan Bishop em 1955, este método, leva em consideração a análise de um talude, utilizando a divisão da cunha de escorregamentos em diversas fatias. Inicialmente foi implantado para a análise de superfícies circulares, embora possa ser aplicado a superfícies não circulares, outra hipótese levada em conta no método, são que as forças entre as fatias são horizontais. Os bons resultados do fator de segurança fornecidos por este método, determinaram uma série de estudos mais aprofundado sobre o método.

O cálculo do fator de segurança é realizado ignorando as forças de corte entre as fatias, atendendo apenas o equilíbrio de momentos (Figura 16).

Figura 16 - Distribuição de forças em uma fatia de solo, método de Bishop.



Fonte: Silva (2010).

De acordo com Costa (2012), O cálculo do fator de segurança para os parâmetros do solo considerado é obtido através da expressão (Equação 10).

$$FS = \frac{1}{\sum W \cdot \text{sen } \alpha} \cdot \sum \left[\left[c' \cdot b + (W(1 - ru) + (X_{n1} - X_n)) \tan \Phi' \right] \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi \cdot \tan \alpha}{FS}} \right] \quad (7)$$

Na qual:

c' = coesão (kPa)

b = largura da fatia (m)

W = peso próprio da fatia (kN)

ru = pressão intersticial

Φ' = ângulo de atrito ($^\circ$)

α = Inclinação da base

X_{n1} = Resultante das tensões cisalhantes na face direita da fatia

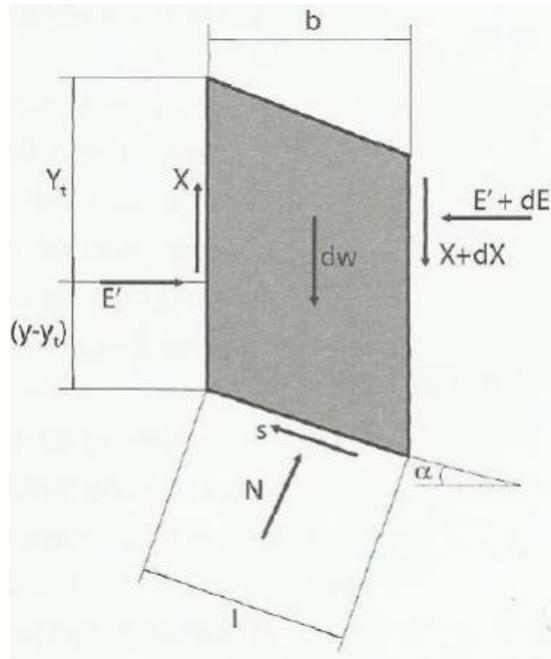
X_n = Resultante das tensões cisalhantes na face esquerda da fatia

5.6.2.2 Método de Janbu

Instituído por Nilmar Janbu em 1954, avalia o fator de segurança para qualquer tipo de superfície de ruptura, satisfazendo as equações de equilíbrio de forças verticais e horizontais (Figura 17). Entretanto, despreza os esforços cisalhantes entre as fatias (Janbu, 1968). A análise parte dos seguintes pressupostos: (i) qualquer forma

de superfície de ruptura, (ii) método do equilíbrio das forças (iii) as forças laterais midas são horizontais para todas as lamelas.

Figura 17 - Distribuição de forças em uma fatia de solo, método de Janbu.



Fonte: Georscovich (2012).

O cálculo do fator de segurança adequado para os parâmetros do solo considerado é obtido através da expressão (Equação 11).

$$FS = \frac{\sum b \left[c' + \left(\frac{W + dX}{b} - U \right) \text{tg} \Phi' \right]}{dE + \sum [dx(W + dX) \text{tg} \alpha]} \frac{1}{n\alpha} \quad (8)$$

Na qual:

c' = coesão (kPa)

b = largura da fatia (m)

W = peso próprio da fatia (kN)

Φ' = ângulo de atrito ($^\circ$)

α = Inclinação da base

$n\alpha$ = parâmetro definido em função da geometria e determinado graficamente para cada fatia em função da inclinação da base

E = forças de interação normais

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo proposto, foram definidas duas etapas principais; laboratório e campo. Os tópicos a seguir especificam as metodologias e materiais utilizados em cada etapa desta pesquisa.

6.1 Atividades de laboratório

- Pesquisa e revisão bibliográfica (dados locais, histórico, mapas, arquivos digitais, cartas topográficas, fotos, etc.);
- Planejamento de campo – Pré-campo (determinação da área de estudo; geração do *checklist* geotécnico, mapas e perfis; locação de perfis geofísicos, comprimento e arranjos dos perfis geofísicos e georeferenciamento da área);
- Integração de dados – Pós-campo (Utilização de modelos computacionais para análise de estabilidade de taludes e percolação de água no interior do barramento, geração de mapas lito-geofísicos-geotécnicos, composição de imagens e interpretação dos perfis geofísicos, integração em ambiente SIG, MDT, litologia e solo).

6.2 Atividades de campo

O estudo de campo foi realizado no final do mês de julho de 2018, totalizando 3 dias de campo. Em sua execução foram separados os dias para cada âmbito abordado no trabalho, estes, descritos de maneira mais detalhada nos itens subsequentes (6.2.1; 6.2.2 e 6.2.3).

Para o desenvolvimento do trabalho prático, foram usufruídas as informações de pesquisa e planejamento pré-campo (item 6.1), visando favorecer a interpretação geológica-geotécnica, geofísica e pedológica da área, tal como, os acessos e localização da nascente que escoar para o reservatório da barragem.

6.2.1 Caracterização geológica/estrutural/pedológica na área

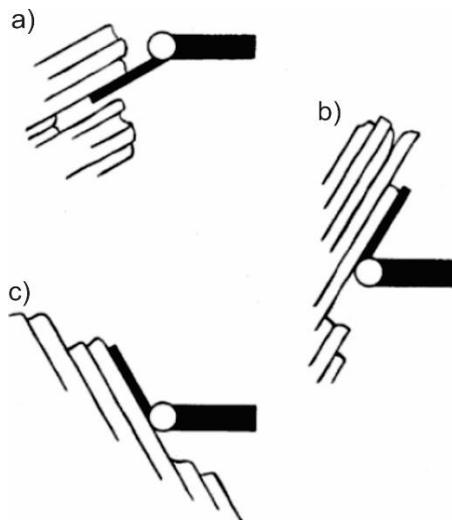
O primeiro dia de trabalho consistiu na realização de análises descritivas do contexto geológico-estrutural e de solos adjacente ao corpo da barragem, permitindo

assim, observar as características petrográficas, estruturais da litologia caracterizada e as informações morfológicas do tipo de solo.

Em sua execução, os instrumentos utilizados foram: caderneta de campo, GPS Garmin modelo Etrex Legend, câmera fotográfica, martelo petrográfico *Estwing* marreta 2,0 kg, bússola do tipo *Brunton* e lupa de mão.

O propósito do primeiro dia de trabalho de campo foi reconhecer o contexto geológico e estrutural da área adjacente a barragem de estudo, bem como o tipo de solo utilizado na construção do barramento. Os afloramentos e os perfis de solo foram descritos respectivamente em termos petrográficos e estruturais, e o solo em termos morfológicos. A análise estrutural durante o reconhecimento geológico consistiu principalmente em aspectos geométricos. Na obtenção de atitudes das feições planares e lineares tais como falhas, fraturas, juntas, dobras, foliações, acamamentos, etc., utilizou-se a notação estrutural tipo *dip-direction* (Figura 18), que é medida a direção do mergulho e o próprio ângulo de inclinação do mergulho (RAGAN, 2009).

Figura 18 - Notação estrutural tipo *dip direction* com bússola. a) direção do ângulo de mergulho do plano (*dip*); b) e c) direção do mergulho do plano (*dip*).



Fonte: extraído e modificado de Ragan (2009).

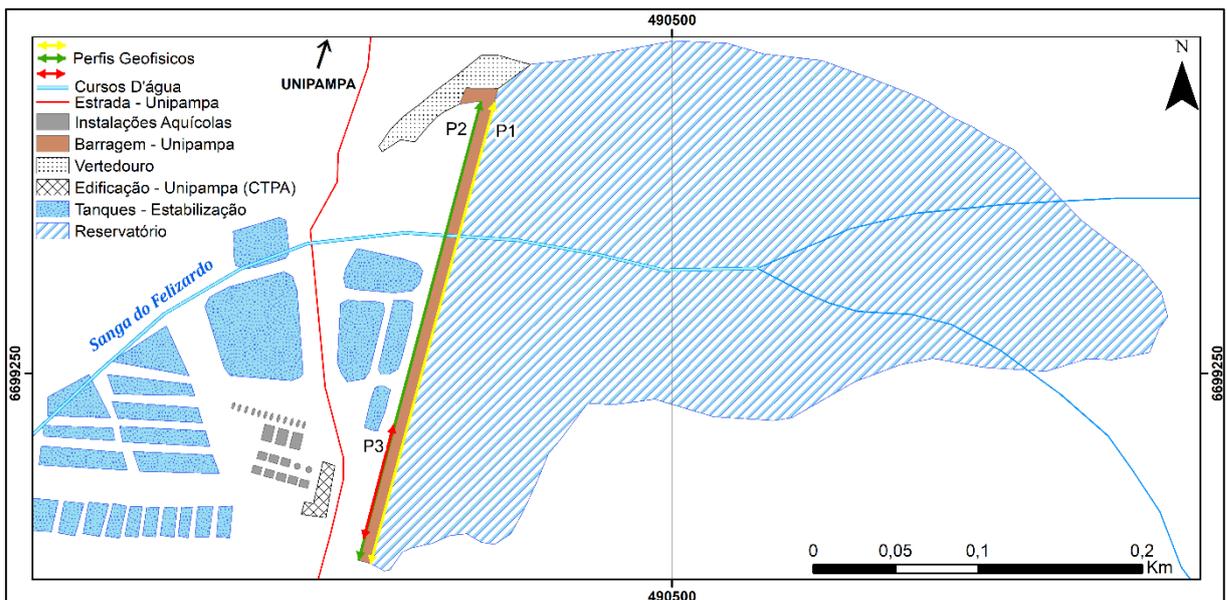
6.2.2 Aquisição geofísica de eletrorresistividade

No segundo e terceiro dia de campo, foi realizada a aquisição e análise dos resultados obtidos a partir do processamento dos dados do levantamento geofísico de Eletrorresistividade. Previamente à aquisição no campo, foi realizado o envio (*upload*) do arquivo configurado no resistímetro, para o aparelho realizar as leituras previstas

em campo (arranjo selecionado, geometria do espaçamento e profundidade teórica de investigação). Nesta etapa, foi empregado o programa ELECTRE II da *IRIS instruments*.

Na execução do levantamento da área, foram realizados três perfis paralelos. Para medir o respectivo espaçamento e comprimento utilizou-se uma trena métrica. O Perfil 1 e 2 possuem um comprimento de 355 metros e o Perfil 3 72 metros. Ambos utilizaram os arranjos Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger, onde as configurações de espaçamento utilizadas para o Perfil 1 e 2 foram de 2,5 metros e no perfil 3 de 1 metro a fim de determinar detalhadamente as camadas de subsuperfície e sua continuidade vertical e lateral, além de possíveis estruturas geológicas (Figura 19).

Figura 19 - Localização da barragem e perfis de eletrorresistividade no campus da Unipampa-Uruguaiana.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para as medidas dos valores de resistividade foi utilizado um resistímetro modelo Syscal Pro de 10 canais da *IRIS Instruments* (França). Os acessórios que integram o aparelho para as leituras no campo são 72 eletrodos, cabos de conexão entre o resistímetro e suas respectivas ligações, fita métrica e marreta para implantação dos eletrodos no solo/rocha, conexão entre os eletrodos e cabos (jacarés) propiciando o contato da corrente elétrica com os eletrodos e solo (Figura 20).

Figura 20 - Composição de imagens dos materiais utilizados no caminhamento elétrico: A) Distribuição dos cabos, eletrodos e resistivímetro no perfil mais próximo ao talude de jusante da barragem (Perfil 2); B) Distribuição dos equipamentos no perfil mais próximo ao talude de montante e C) Unidade de medida e aquisição de dados (resistivímetro).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após a obtenção dos dados no levantamento, procedeu-se com a transferência dos mesmos para um computador. O arquivo gerado foi enviado para o programa RES2DINV da Geotomo Software para a denominada inversão dos dados (aquisição das pseudo-seções em profundidade) e confecção dos perfis com respectivos isovalores de resistividade interpolados para interpretação.

6.2.3 Determinação de parâmetros geotécnicos (permeabilidade, porosidade, estabilidade estrutural do talude da barragem).

O terceiro dia de campo compreendeu a realização de uma rotina (*checklist*) de inspeção regular de barragens (Figura 21) no local de estudo. O objetivo foi mensurar

suas características geométricas utilizando uma trena métrica e descrever as especificações visuais das condições estruturais do corpo do barramento. Através das informações destas análises em conjunto com um material geotécnico dos parâmetros quantitativos específicos (permeabilidade/porosidade) disponível pela Universidade Federal do Pampa (coordenadoria de infraestrutura – Pró-Reitoria de Planejamento, PROPLAN), foram possíveis a construção de modelos computacionais utilizando dois softwares da *Geo-Slope Company-Versão Estudantil* (SEEP/W e SLOPE/W), proporcionando respectivamente, a análise de percolação de água no interior da barragem de terra e as análises da estabilidade dos taludes.

O *software* SEEP/W, está baseado na teoria de elementos finitos para a determinação das linhas freáticas e vazões no interior dos maciços estudados e percolação pela fundação, sendo o programa também produzido pela Geo-Slope Company. O Principal dado gerado é o valor de gradiente hidráulico, pois com este valor poderemos aferir se ocorreram problemas de erosão interna ou não.

O programa SLOPE/W utiliza a teoria do equilíbrio limite para calcular o fator de segurança (FS) de taludes em solos ou rochas. Pode efetivamente analisar problemas simples e complexos para uma variedade de formas de superfícies de deslizamento, condições de pressão de poros de água, propriedades do solo, métodos de análise e condições de carga. O programa tem a habilidade de modelar diferentes tipos de solos, estratigrafias complexas além de geometrias complexas de superfície de escoramento. Variáveis utilizando uma grande variedade de modelos de solos.

Figura 21 - Composição de imagens das características geométricas/estruturais analisadas de acordo com o *checklist* de inspeção regular de barragens: A) Extensão do talude de jusante, com grande presença de vegetação em sua estrutura; B) Vertedouro em concreto e; C) Extensão do talude de montante.

CHECKLIST - INSPEÇÃO REGULAR DE BARRAGENS		
Empresa: Universidade Federal do Pampa – Campus Uruguiana	Data:	
Barragem: Barragem Unipampa – Campus Uruguiana - RS		
Coordenadas:		
Responsável Inspeção:		
a) Confiabilidade das Estruturas Extravasoras		
A barragem apresenta estrutura extravasora?	Sim	Não
A estrutura apresenta trincas?		
Há medidas corretivas em implantação?		
Há vegetação no talude ou na barragem?		
A vegetação esta controlada?		
A barragem tem sistema de drenagem?		
As drenagens estão em bom estado?		
A vegetação compromete a drenagem?		
Observações:		
b) Percolação		
Há infiltração de água pelas trincas?	Sim	Não
Há infiltração de água pelas paredes da barragem?		
A percolação esta controlada pelo sistema de drenagem?		
Há umidade ou surgência nas estruturas da barragem?		
As umidades ou surgências estão sendo controladas?		
Observações:		
c) Deformações e Recalques		
O recalque ou a deformação pode comprometer a barragem?	Sim	Não
A barragem apresenta alguma trinca, rachadura ou abatimento?		
Existem medidas corretivas sendo implantadas?		
Há vegetação crescendo na estrutura da barragem?		
Há vegetação crescendo próximo da barragem?		
Observações:		
d) Deterioração dos Taludes e Paramentos		
Os taludes ou paramentos estão em bom estado?	Sim	Não
Há vegetação crescendo no talude?		
Há focos erosivos no talude ou paramento?		
Medidas corretivas estão sendo implantadas?		
Há movimentação de massa que pode comprometer a estrutura?		
Observações:		
e) Análise Geométrica da Barragem		
Altura do Pé da Barragem até o topo		
Inclinação do Talude		
Comprimento da Barragem		
Observações:		





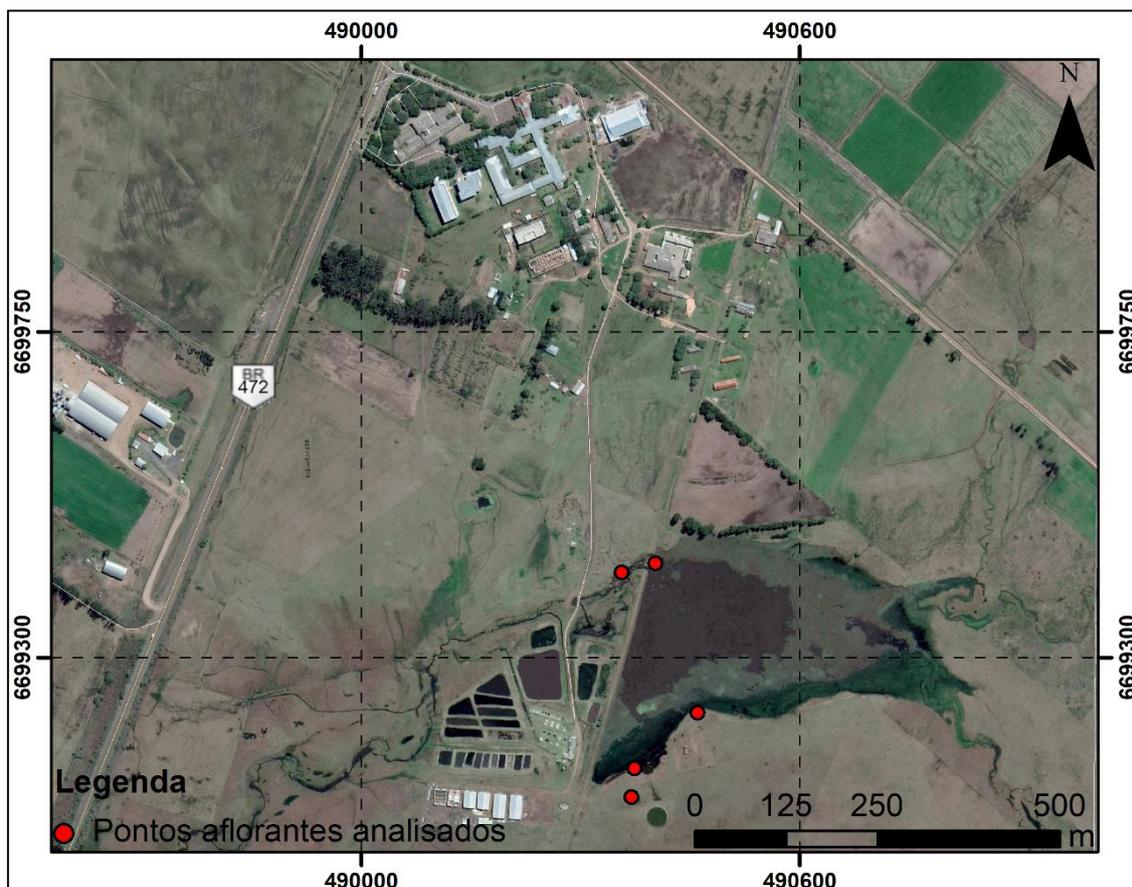
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Análise Geológica-Estrutural, Pedológica e Hidrográfica

Nesta etapa, o estudo restringiu-se aos afloramentos e exposições de solo mais próximos a Barragem de Terra (BT), com localização tanto na margem noroeste (vertedouro) como sudeste (entrada) do reservatório da barragem (Figura 22).

Figura 22 - Mapa de localização dos afloramentos estudados na área.



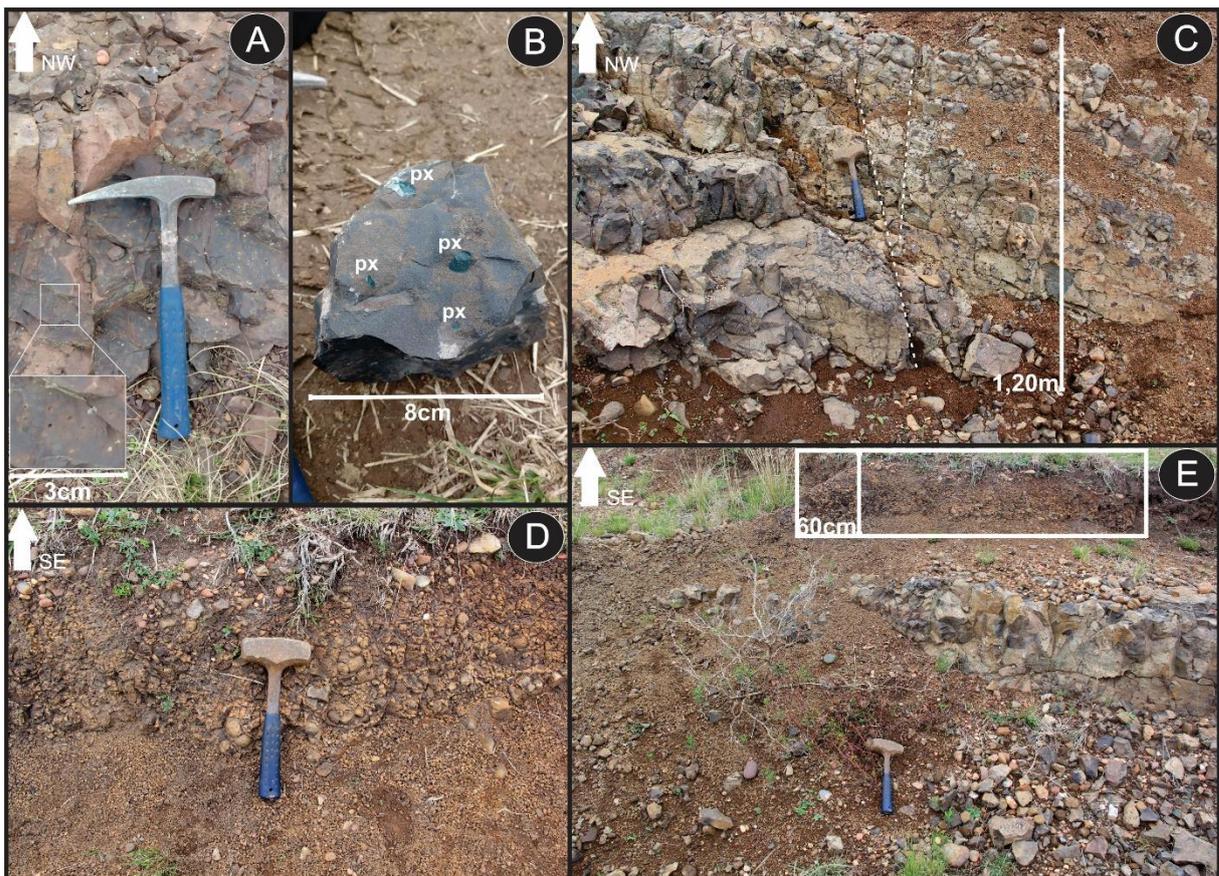
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As rochas são classificadas como basaltos que correspondem toda unidade da área mapeada, cujas ocorrências se dispõem no entorno da BT, de maneira menos alterada em sua borda nordeste. A FSG (Formação Serra Geral) na área mapeada consiste de rochas vulcânicas, classificadas como basaltos e basaltos andesíticos predominantemente fraturado, com estruturas vesiculares e amigdalóides. A mineralogia, em geral, é constituída a base de plagioclásio e piroxênio (Augita).

Quanto à textura, variam desde vítrea até porfirítica. As fraturas estão direcionadas predominantemente para os quadrante NE e NW, apresentando mergulho médio de 50°. Já o contexto pedológico é definido por solos classificados predominantemente como argilosos em substrato basáltico, de textura média, com a presença diminuta de fragmentos de rocha (Figura 23).

As atitudes estruturais no basalto, se distribuem de forma paralela e perpendicular ao corpo da BT, podendo influenciar no direcionamento de fluxo e percolação de água. Além disso, as características do litotipo podem dificultar a resistência da estrutura do vertedouro de cimento construído.

Figura 23 - Composição de imagens das feições geológico-pedológicas da área: A) Porção detalhada do afloramento analisado, com destaque para as estruturas vesiculares presentes; B) Amostra do litotipo caracterizado na área, de textura porfírica e assembleia mineralógica determinada por plagioclácios milimétricos e porfiroclastos de piroxênio imersos numa matriz fanerítica muito fina; C) Ampliação do afloramento estudado, contexto adjacente ao vertedouro da barragem, com cerca de 1,20m de altura e marcado pelas estruturas rúpteis, com destaque para duas orientações preferenciais (NW-SE/NE-SW); D) Porção detalhada da exposição de solo em talude, com cerca de 60cm de espessura e fragmentos de rocha imersos na matriz argilosa e; E) Extensão do talude observado, localizado adjacente ao reservatório da barragem, dando ênfase no limite entre solo/rocha e posição da porção de detalhe descrita no item D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A drenagem que ocorre no local é uma nascente denominada de Arroio Felizardo, principal curso d'água do reservatório da barragem de terra da Universidade Federal do Pampa (Figura 24).

Figura 24 - Nascente do Arroio Felizardo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

7.2 Análise Geofísica

Para interpretação de cada um dos arranjos geométricos utilizados foram elaboradas seções de resistividade elétrica (Figuras 25-30). Observa-se comparativamente que durante o processamento dos dados e a geração dos modelos de inversão de resistividade aparente, os arranjos dipolo-dipolo possuem maior alcance lateral, devido a configuração geométrica programada para esse arranjo. Os arranjos Wenner-Schlumberger possuem menor cobertura lateral, porém, maior alcance vertical e menores erros RMS (*Root-Mean-Square*) para 4 e 5 iterações.

Os valores de resistividade apresentados pelas seções geofísicas oscilaram entre 3,1 e 5820 ohm.m, sendo os resultados classificados como baixos resistivos (<100 ohm.m), intermediários (100 - 250 ohm.m) e altos resistivos (>250 ohm.m). Desta maneira, foram determinados limites e subdividas as camadas de acordo com a escala de cores gerada e a simbologia adota na interpretação das mesmas.

Nos perfis realizados no corpo do barramento, tanto à montante, quanto à jusante, evidenciou-se que as porções superiores são possivelmente compostas por solos argilosos, predominantemente de menor resistividade, devido a saturação de água no corpo do barramento e que se estendem horizontalmente por todo os perfis. Nas porções inferiores, aproximadamente maiores que 8 metros, constatou-se zonas de resistividade elevada representada pelos basaltos da Formação Serra Geral, intercaladas ou limitadas por resistividades intermediárias, caracterizadas pelos arenitos da Formação Botucatu, concordando assim, com a estratigrafia regional.

Outro atributo considerado nos perfis geofísicos, foi a diminuição do espaçamento de 2,5 para 1 metro nos eletrodos do Perfil 3, com intuito de discernir detalhadamente a provável posição inicial de saturação em água na BT, em razão de ter sido constatada umidade no pé do talude jusante, entre os 80 metros finais (sudoeste) da crista da barragem.

Perfil 1 – P1 (Dipolo-Dipolo): Esta seção localiza-se à montante da crista do corpo do barramento, com comprimento de 355m, de nordeste (vertedouro) a sudeste (porteira de entrada da área). Obteve um erro RMS de 16,4% após quatro iterações e apresenta quatro camadas geoeletricas: (a) a primeira camada ocorre desde a superfície até a profundidade média de 7,5 metros e extensão horizontal de cerca de 20 metros, com resistividade elétrica de 85 a 175 ohm.m., interpretada como um solo argiloso (zona não saturada); (b) a segunda camada possui valores de resistividade elétrica entre 8 e 80 ohm.m, desde a superfície até a profundidade de 15 metros e maior extensão horizontal com cerca de 330 metros, interpretada como um solo argiloso com presença de água (zona saturada); (c) a terceira camada geoeletrica, mostra uma maior espessura vertical cerca 35m e extensão horizontal de 300m, no qual, os valores de resistividade foram maiores, variando entre 161 e 1640 ohm.m, interpretada como rochas da Formação Serra Geral (possíveis basaltos – Fácies Alegrete) e; (d) a camada quatro ocorre nas porções mais profundas da seção, com cerca de 200 metros de extensão lateral e 30 metros de espessura, os valores de resistividade variam entre 16 e 161 ohm.m, definida como os arenitos da Formação Botucatu (Figura 25).

Perfil 1 – P1 (Wenner-Schlumberger): A seção apresentou um erro RMS de 6% após quatro iterações, com as mesmas quatro camadas do P1 (Dipolo-Dipolo): (a) na parte mais rasa da seção (camada 1), os valores de resistividade variam entre 14 e 154,5 ohm.m. Esta, ocorre desde a superfície até cerca de 18 metros, com uma extensão horizontal abrangente em toda área do perfil, classificada como um solo argiloso com presença de água (zona saturada); (b) entre a posição horizontal 7,5-15 metros e uma profundidade entre 5 e 9 metros, ocorre a camada 2, em que os valores de resistividade são de 154,5 a 194 ohm.m, interpretada como solo argiloso (zona não saturada); (c) após a zona saturada (camada 2), evidencia-se uma resistividade elétrica entre 67,7 e 154,5 ohm.m., que delimita a geometria da quarta camada entre as posições 32,5 e 325m, interpretada como terceira camada e representada pelo arenito da Formação Botucatu e; (d) a quarta camada mostra uma maior espessura vertical cerca 50m e extensão horizontal de 280m, com valores de maior resistividade, variando entre 194 e 950 ohm.m, interpretada como rochas da Formação Serra Geral (possíveis basaltos – Fácies Alegrete) (Figura 26).

Perfil 2 – P2 (Dipolo-Dipolo): Esta seção localiza-se à jusante da crista do corpo do barramento, com comprimento de 355 metros, de nordeste (vertedouro) a sudeste (porteira de entrada da área). Obteve um erro RMS de 6,2% após cinco iterações e apresenta quatro camadas geoeletricas: (a) a camada superficial (camada 1), ocorre até a profundidade média de 12 metros, extensão horizontal abrangente em toda seção e resistividade elétrica de 10,7 a 105 ohm.m, interpretada como solo argiloso na presença de água (zona saturada); (b) na segunda camada, porção de menor espessura (3m), os valores de resistividade variam de 145,5 e 186 ohm.m., estendendo-se por cerca de 280m e classificada como um solo argiloso; (c) a terceira camada possui valores de resistividade elétrica entre 186 e 1040 ohm.m, ocorrendo desde o limite da camada 2 até a profundidade total no centro da seção e uma extensão horizontal com cerca de 280 metros, definida como rochas da Formação Serra Geral (possíveis basaltos – Fácies Alegrete); e; (d) a camada quatro ocorre nas porções mais profundas da seção, espessura de até 36 metros, com cerca de 200 metros de extensão lateral somando as duas zonas de abrangência (80-235 e 260-310 metros), os valores de resistividade variam entre 33,5 e 186 ohm.m, definida como arenitos saturados da Formação Botucatu (Figura 27).

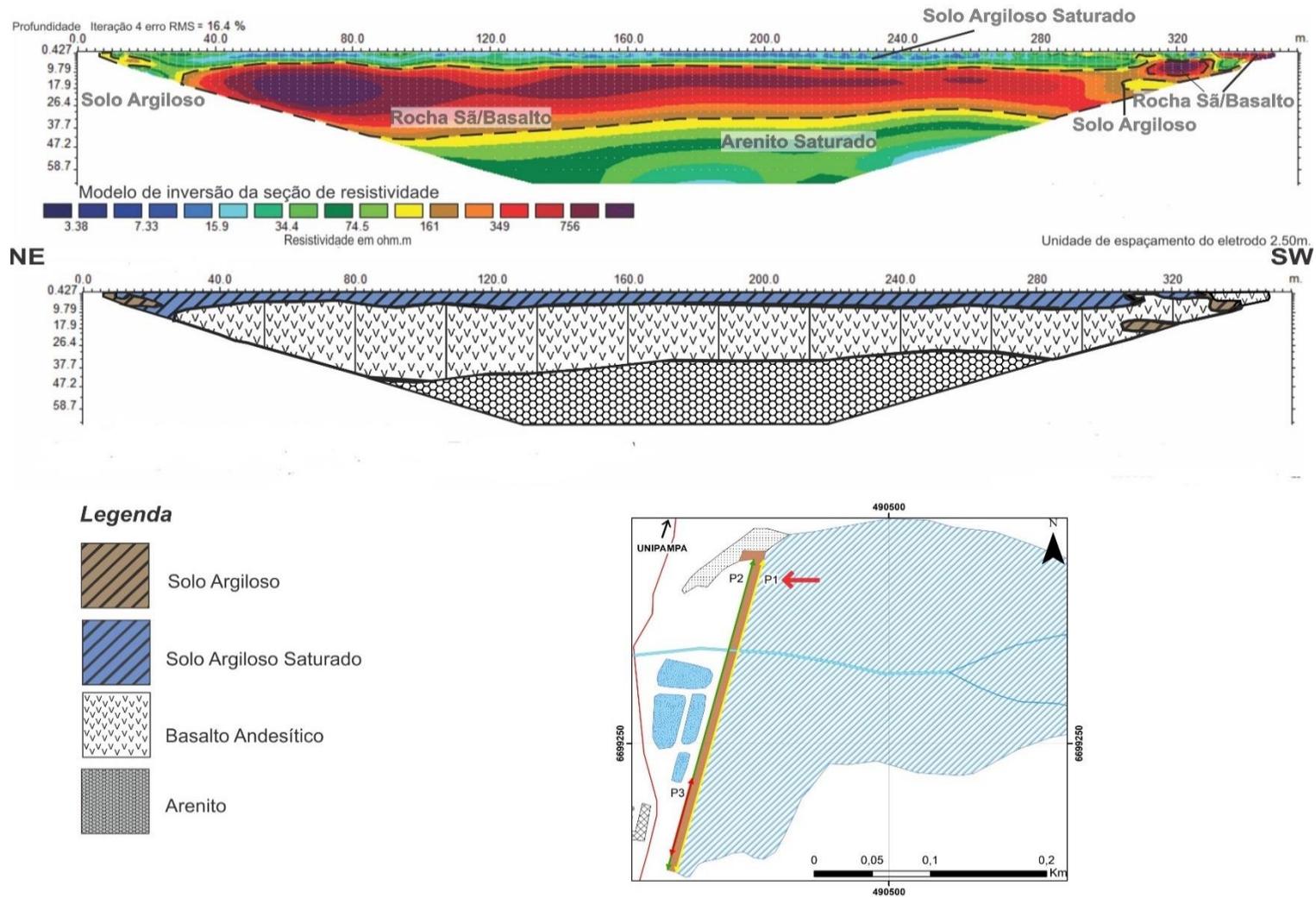
Perfil 2 – P2 (Wenner-Schlumberger): A seção obteve um erro RMS de 5,7% após cinco iterações e apresenta quatro camadas geoeletricas: (a) a camada 1, ocorre a partir de 310 metros até o final da seção, com menor abrangência vertical (3 metros), onde os valores de resistividade variam de 65,1 e 188 ohm.m., classificada como um solo argiloso; (b) na camada 2, a espessura é de cerca de 16 metros, com extensão horizontal em toda seção e resistividade elétrica variando entre 13,3 a 149,5 ohm.m, interpretada como um solo argiloso saturado; (c) a terceira camada possui valores de resistividade elétrica entre 88 e 188 ohm.m, ocorrendo desde o limite da camada 2 até a profundidade total na porção central da seção e extensão horizontal com cerca de 300 metros, estabelecida como arenito da Formação Botucatu; e; (d) a quarta camada possui a maior espessura da seção, com cerca de 58,25 metros, a extensão lateral é de 280 metros somando as duas zonas de abrangência, os valores de resistividade variam entre 188 e 922 ohm.m, interpretada como rochas da Formação Geral (possíveis basaltos – Fácies Alegrete) (Figura 28).

Perfil 3 – P3 (Dipolo-Dipolo): A seção localiza-se à jusante da crista do corpo do barramento, com comprimento de 72 metros, de nordeste (próximo ao último tanque de estabilização) a sudeste (porteira de entrada da área). Obteve um erro RMS de 7,6% após quatro iterações e apresenta três camadas geoeletricas: (a) a camada 1, ocorre até a profundidade média de 1,30 metros, estendendo-se lateralmente em toda seção e resistividade elétrica entre 43,4 a 215 ohm.m, classificada como um solo argiloso com presença de blocos de basalto; (b) na segunda camada, porção de menor espessura (3 metros), os valores de resistividade variam de 3,11 e 43,4 ohm.m., com extensão horizontal por toda seção e classificada como solo argiloso em grande presença de água (zona saturada); (c) a terceira camada possui valores de resistividade elétrica entre 58,45 e 215 ohm.m, ocorrendo desde o limite da camada 2 até a profundidade total no centro da seção e uma extensão horizontal com cerca de 40m, definida como início do substrato basáltico da Formação Serra Geral (Fácies Alegrete) (Figura 29).

Perfil 3 – P3 (Wenner-Schlumberger): A seção obteve um erro RMS de 1,82% após quatro iterações e apresenta duas camadas geoeletricas: (a) a camada 1, ocorre até a profundidade média de 8 metros, estendendo-se lateralmente em toda seção e com

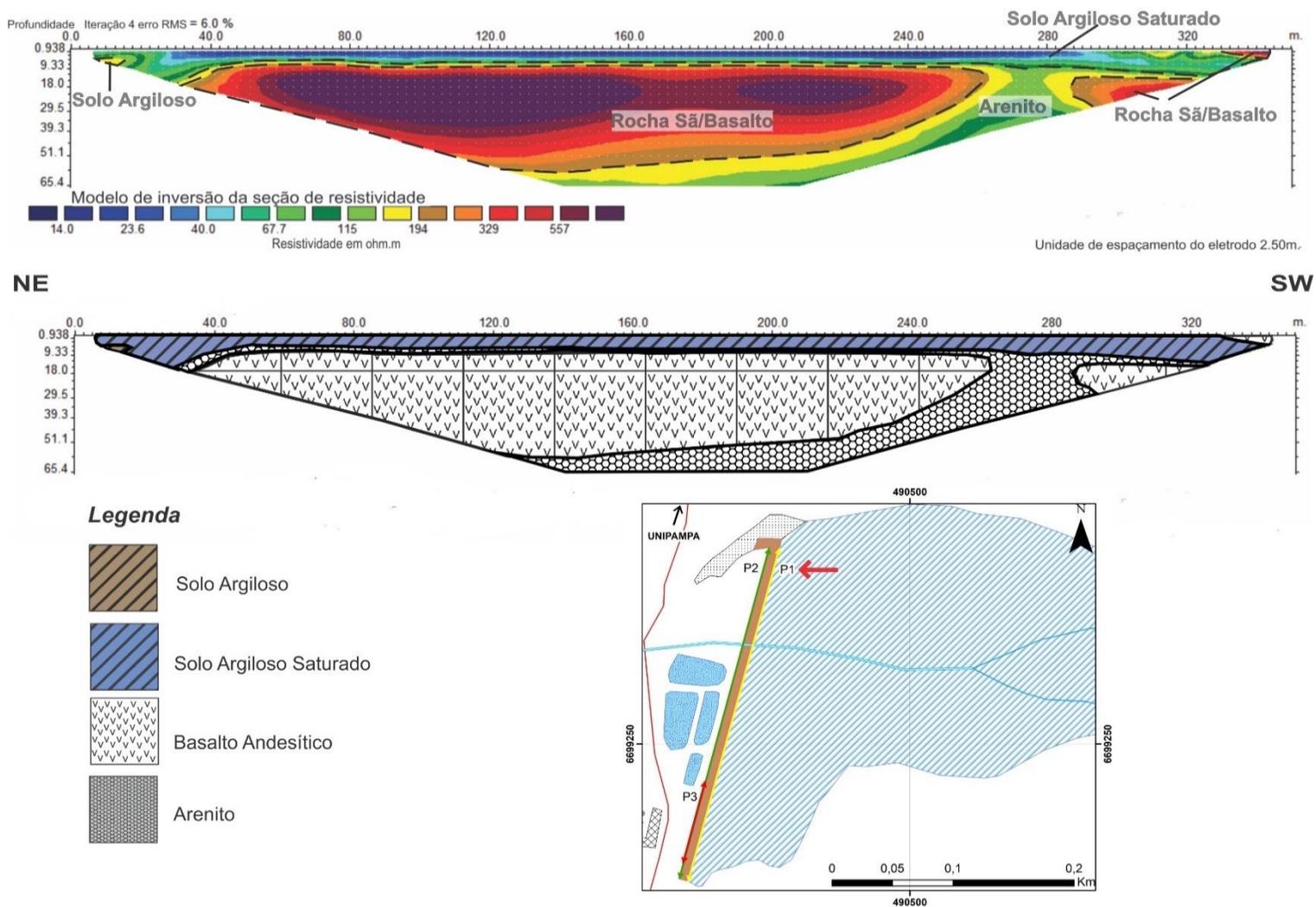
resistividade elétrica entre 6,08 a 553 ohm.m., é interpretada como um solo argiloso predominantemente saturado, com possíveis localizações iniciais de saturação em água, nas posições 16, 48 e 64 metros; (b) na segunda camada, porção de menor espessura (5 metros), os valores de resistividade variam de 553 e 5820 ohm.m., com extensão horizontal de 32m e classificada como rochas da Formação Geral (possíveis basaltos – Fácies Alegrete) (Figura 30).

Figura 25 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil1-P1) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.



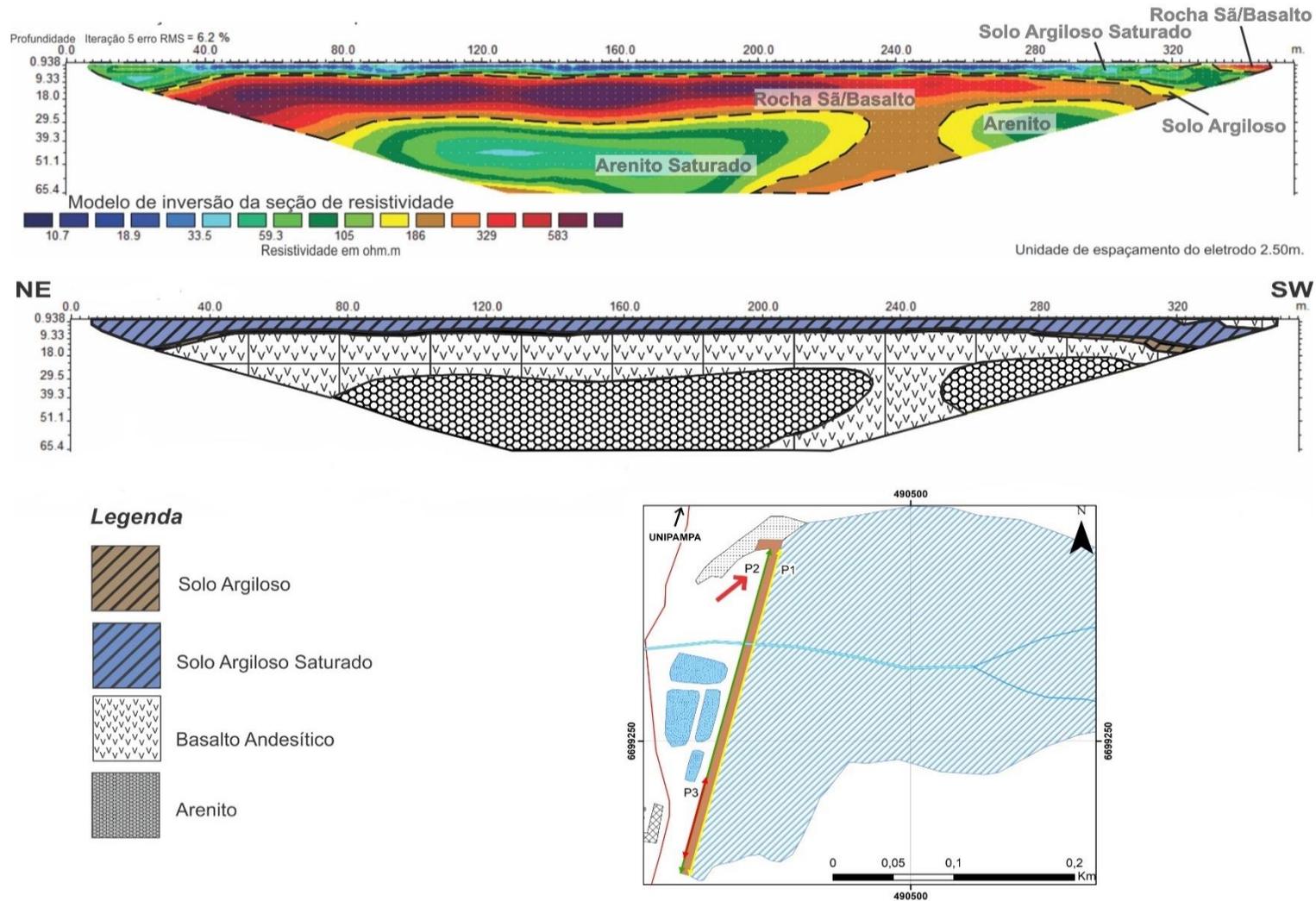
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 26 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil1-P1) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.



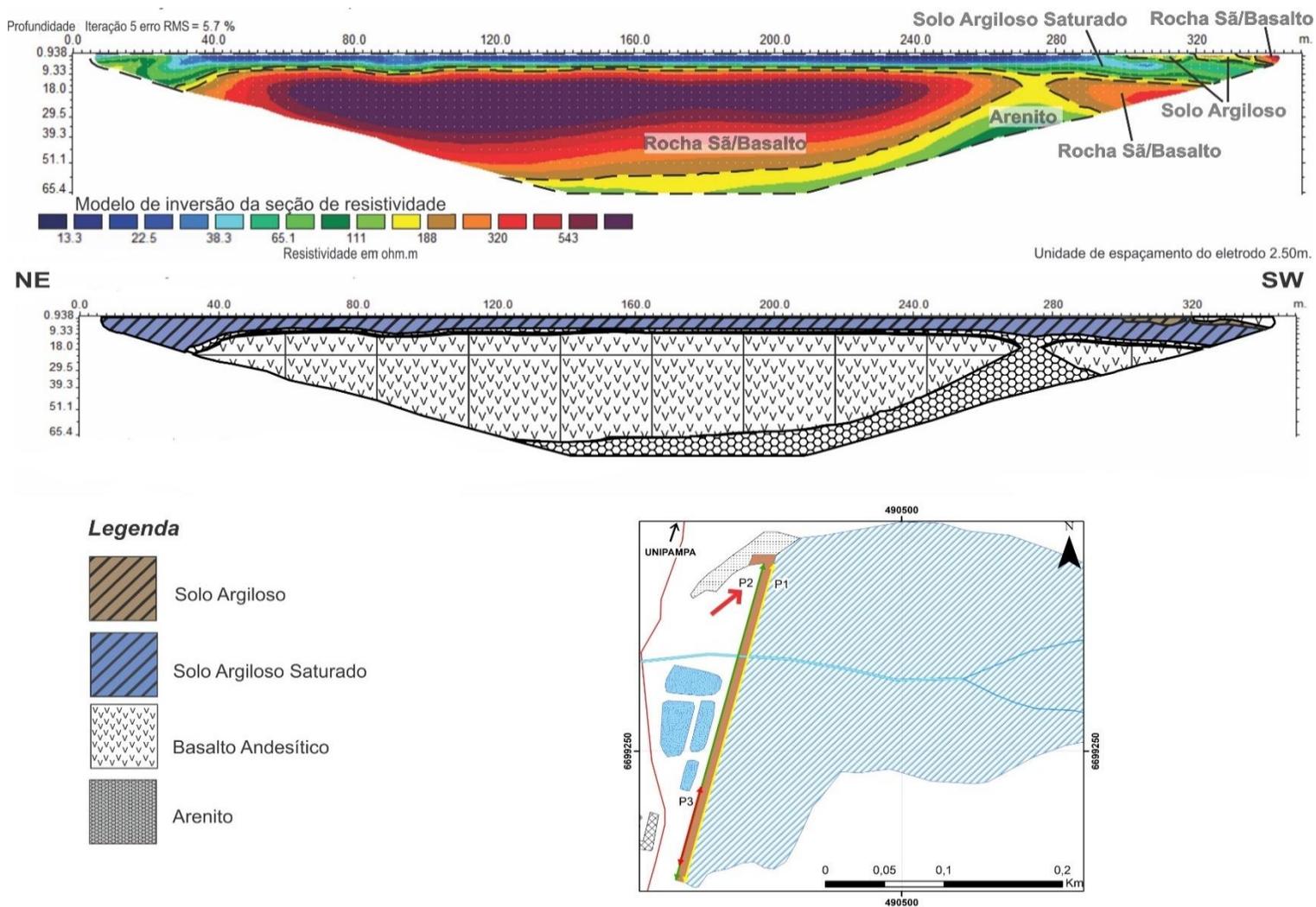
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 27 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil2-P2) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.



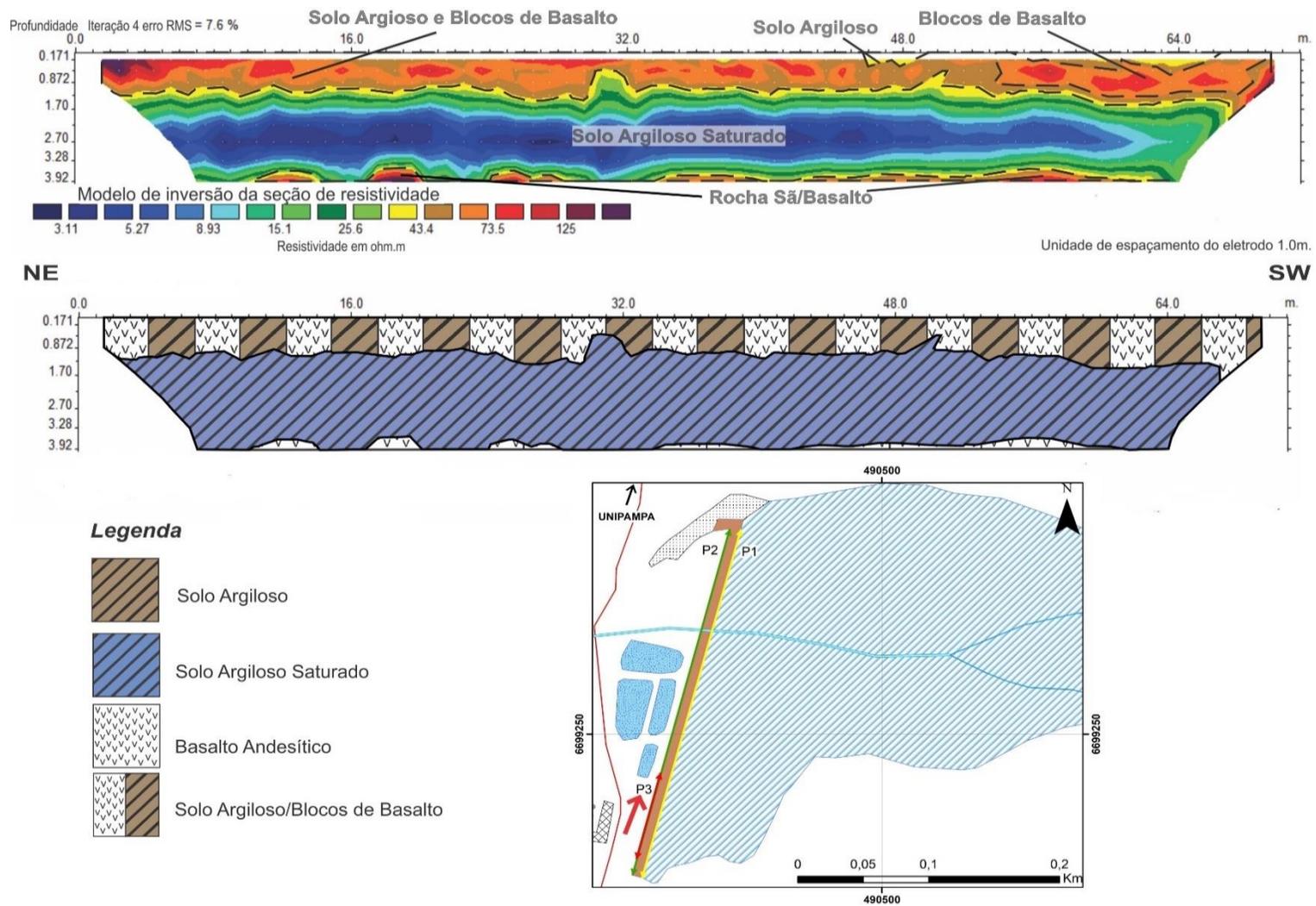
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 28 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil2-P2) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.



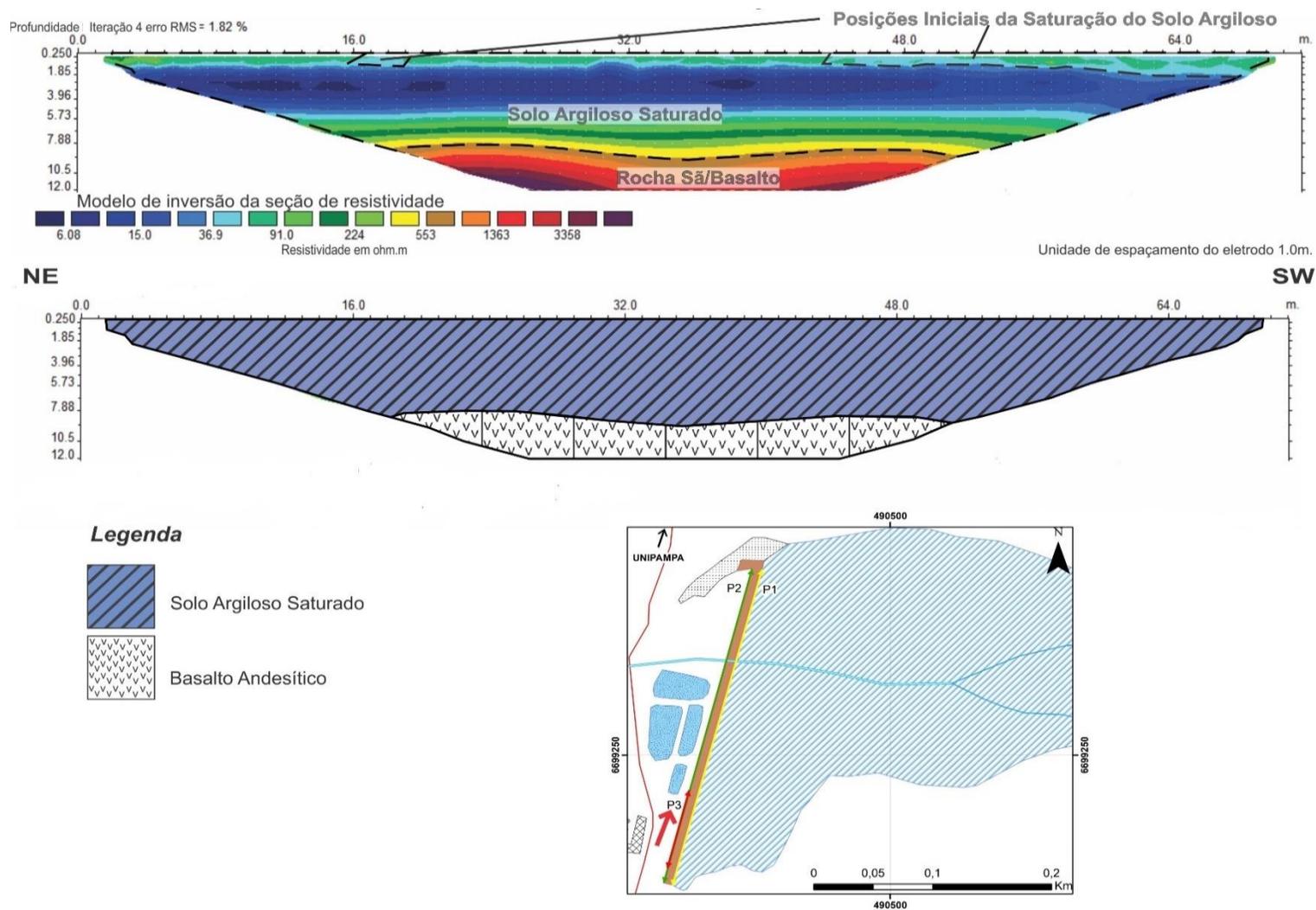
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 29 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil3-P3) para o arranjo Dipolo-Dipolo e sua interpretação geológico-geotécnica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 30 - Perfil de caminhamento elétrico (Perfil3-P3) para o arranjo Wenner-Schlumberger e sua interpretação geológico-geotécnica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

7.3 Análise Geotécnica

Consistiu respectivamente da obtenção e análise dos parâmetros geotécnicos e de projeto realizados na Universidade. Seguido posteriormente, pela geração dos modelos de permeabilidade e estabilidade de taludes da barragem, com objetivo de avaliar e determinar as condições de segurança associadas a barragem de terra.

7.3.1 Parâmetros geotécnicos

Os principais e fundamentais parâmetros de projeto para o cálculo de estabilidade de taludes e percolação de água no corpo da barragem foram obtidos em campo, através do reconhecimento das condições estruturais e geométricas da BT e, em laboratório, com os parâmetros dos ensaios de SPT compartilhados pela UNIPAMPA.

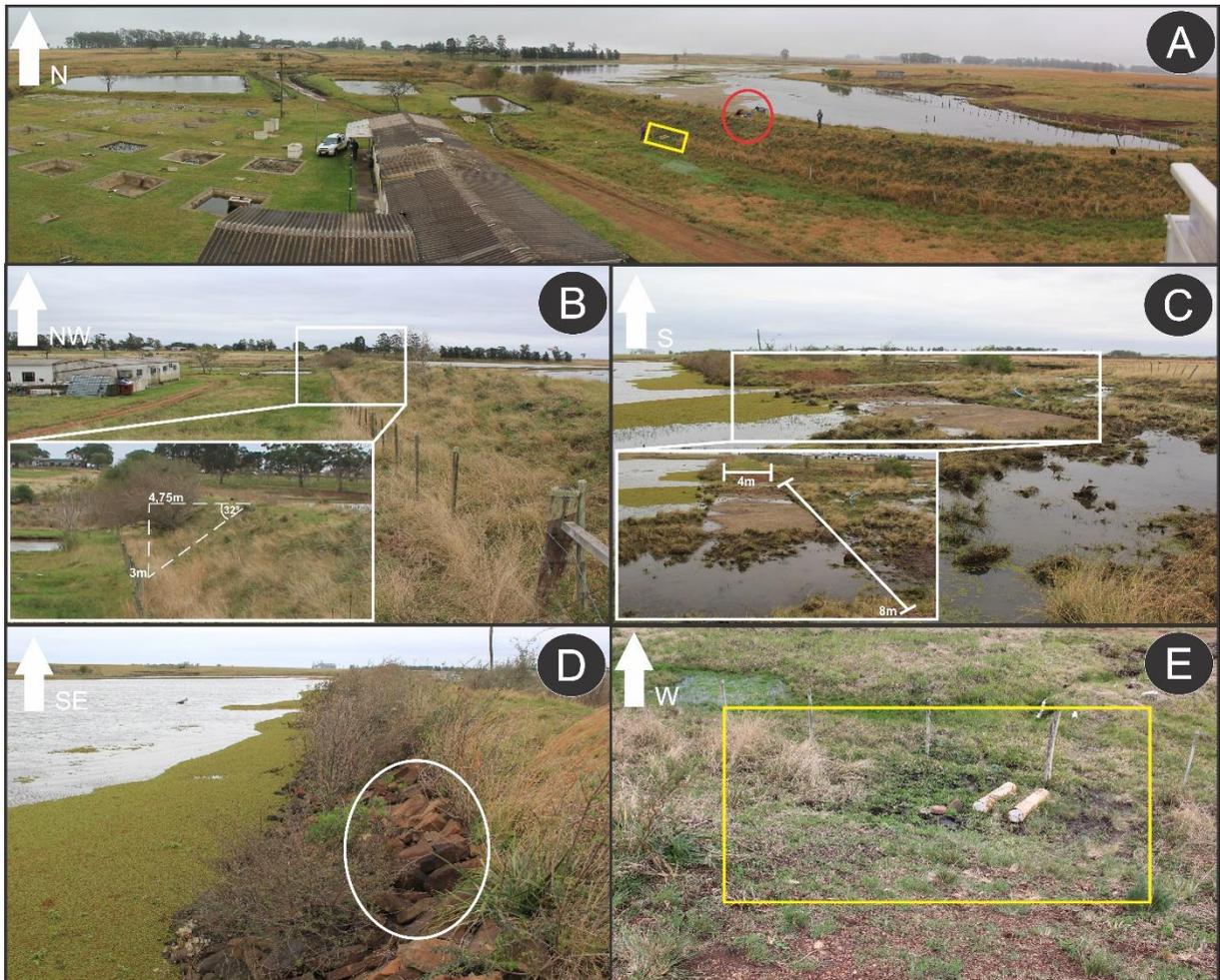
7.3.2 *Cheklis*t de Inspeção das Estruturas

As verificações relacionadas ao estado das estruturas do corpo do barramento (Figura 31) foram realizadas de acordo com a lista de características especificadas para análise em campo (Figura 21), elencadas em:

- i) **Confiabilidade das Estruturas Extravasadoras:** A barragem apresenta estrutura extravasora, sem existência de trincas, com vegetação controlada no talude e na barragem, além de não apresentar sistema de drenagem na BT.
- ii) **Percolação:** Não há presença de infiltração de água pelas paredes da barragem, porém existem umidades próximas ao pé do talude de jusante, de maneira mais abrangente nas porções mais a sudoeste da crista da barragem.
- iii) **Deformações e Recalques:** Não existe nenhum tipo de influência com relação a estes aspectos.
- iv) **Deterioração dos Taludes e Paramentos:** Os taludes apresentam-se em bom estado, com vegetação crescendo em suas estruturas e protegidos de efeitos erosivos no talude à montante com blocos de basalto.

- v) Análise Geométrica: A barragem apresenta uma altura do pé da barragem até o topo de sua crista, com aproximadamente 3m, com inclinação máxima do talude de 32° e 4m de largura da crista.

Figura 31 - Composição de imagens das características geométricas e estruturais da barragem: A) Foto panorâmica da região da barragem de terra, com destaque em amarelo para a localização da zona de maior umidade constatada no *checklist* e em vermelho a bomba d'água presente no reservatório; B) Imagem do talude de jusante e em detalhe as medidas geométricas analisadas no mesmo; C) Condições da zona extravasador da barragem, dando ênfase para sua extensão e a espessura da crista (taipa) da barragem; D) Talude de montante com blocos de basalto utilizados como suporte físico contra as ondas e; E) Zona de umidade no talude de jusante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados da avaliação de especificações estruturais da barragem seguem os padrões de integridade e segurança normais, porém pondera-se alguns pontos que

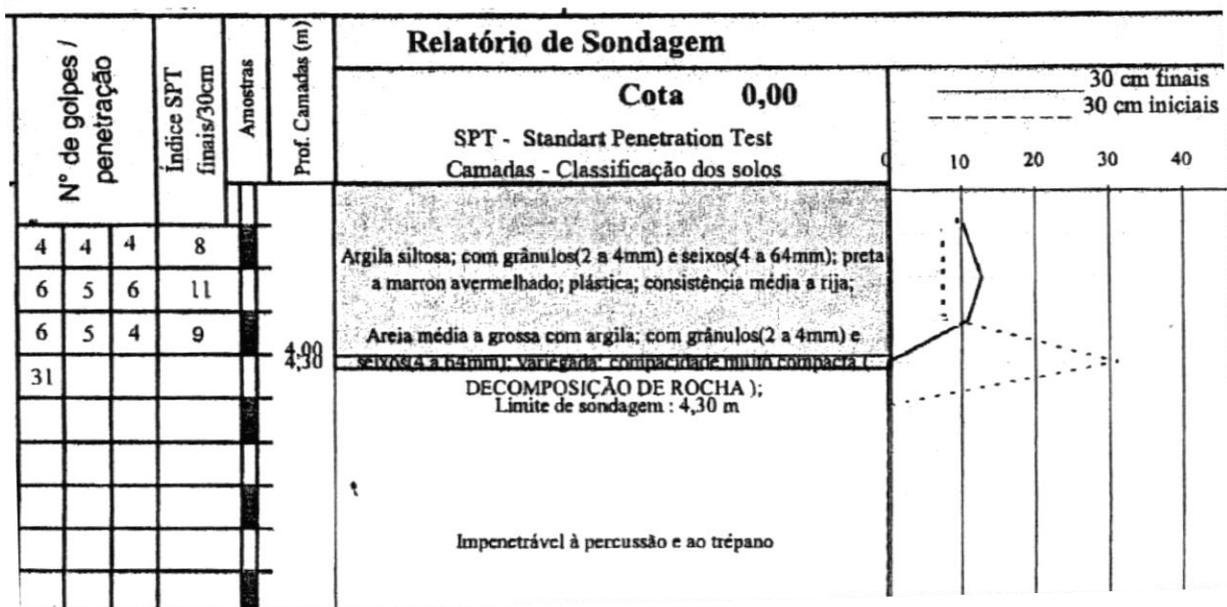
apresentam um certo cuidado e que devem ser monitorados, como é o caso da presença de umidades no pé da barragem (Figura 31-E) e excesso de vegetação nos taludes (Figura 31-B/D).

A saída de água pelo pé do talude de jusante é um efeito normal, porém além do fato da barragem ser um material permeável outras causas também podem desencadear a presença de água no local, tais como a presença de uma bomba d'água inserida no reservatório e que adentra na estrutura interna do corpo da BT, para retirada da água do reservatório e abastecimento dos tanques de estabilização adjacentes ao talude de jusante. Outra possibilidade, seria que a umidade estaria associada ao efeito de acumulação pluviométrica no local.

7.3.3 Dados de Sondagem de Simples Reconhecimento

O índice SPT foi obtido através do relatório de sondagem da área de estudo, que por motivos alheios foram suprimidos os dados da empresa executora (Figura 32).

Figura 32 - Relatório de Sondagem (SPT).



Fonte: UNIPAMPA (2018).

A uma profundidade de 4m, logo acima do limite de sondagem (decomposição de rocha), o solo apresentou um índice de resistência N_{SPT} final e inicial igual a 9 e é

também onde termina a camada de areia média a grossa com argila; com grânulos (2 a 4mm) e seixos (4-64mm). Portanto, o perfil de sondagem apresentou N_{SPT} (número de batidas necessárias para descer os últimos 30 cm) médio de 9 golpes, sendo este o valor de referência.

Através do SPT e da análise in-loco (item 7.1) pode-se constatar que o solo da região é caracterizado por uma camada única de argila siltosa, com poucos fragmentos de rocha. Este solo varia de 3 a 4 metros de profundidade. Após essa camada uma espessa camada de decomposição de rocha, a qual, em ensaios de SPT apresenta-se como impenetrável.

Destacamos que o solo utilizado para a estrutura de barramento (corpo da barragem) foi retirado do próprio terreno do campus.

7.3.4 Parâmetros de projeto

As propriedades mais significativas de um solo, na discussão de problemas de estabilidade, são o ângulo de atrito, coesão e peso específico natural. Valores típicos de coesão, ângulo de atrito e peso específicos de solos se acham relacionados na Quadro 1.

Quadro 1 - Valores típicos de ângulo de atrito e coesão obtidos a partir de ensaios de cisalhamento em diversos tipos de argila.

PROPRIEDADES TÍPICAS DE SOLOS E ROCHAS							
PESO ESPECÍFICO			ÂNGULO DE ATRITO		COESÃO		
Tipo	Material	g/cm ³	Material	Grau	Material	kg/c m ²	
COESIVO	ARGILA	Seca	1,76	Bloco de Argila Seca	30	Bloco de Argila	1,75
		Úmida	1,84	Bloco de Argila Úmida	40	Muito Rijo	
		Molhada	1,92	Argila Rija	10-20	Argilito Rijo	1,50
		Marga Arenosa	1,60	Argila Mole	5-7	Argila Rija	1,00
		Marga	1,76	Preenchimento Argiloso	10-20	Argila Média	0,50
		Com Pedregulho	2,00	Material calcítico de zona de cisalhamento Material de falha em folhelho	20-27 14-22		

Fonte: Extraído e modificado de Hoek & Bray (1974).

O ângulo de atrito interno pode ser correlacionado com o N_{SPT} de acordo com Décourt (1989) apresentado pelo Tabela 2.

Tabela 2 - Correlação entre N_{SPT} e o ângulo de atrito interno Φ .

N_{SPT}	ÂNGULO DE ATRITO – Φ ' (°)
6,41	30
7,63	31
9,02	32
10,59	33
12,37	34

Fonte: Modificado de Décourt (1989).

De acordo com Godoy (1972) o peso específico do solo pode ser estimado através da correlação com o N_{SPT} , conforme o Tabela 3.

Tabela 3 - Correlação entre N_{SPT} e o peso específico do solo.

N_{SPT}	CONSISTÊNCIA	PESO ESPECÍFICO (kN/m^3)
≤ 2	Muito Mole	13
3-5	Mole	15
6-10	Média	17
11-19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Extraído e modificado de Godoy (1972).

7.3.5 Referências para projeto

De acordo com os parâmetros especificados no item anterior, os seguintes dados foram obtidos em visita “*in loco*” e alguns estimados a partir de sondagens e bibliografia pertinente:

- a) Coesão = 5 kPa;
- b) Ângulo de atrito = 32° ;
- c) Peso específico natural do solo = 17 kN/m^3 ;
- d) Carga permanente/acidental = 0 kN/m.
- e) Altura do Talude = 3,00 metros.
- f) Condutividade hidráulica = $1,00 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Destaca-se que o talude da barragem foi considerado como totalmente saturado e que não existe nenhuma carga acidental ou permanente na crista do talude.

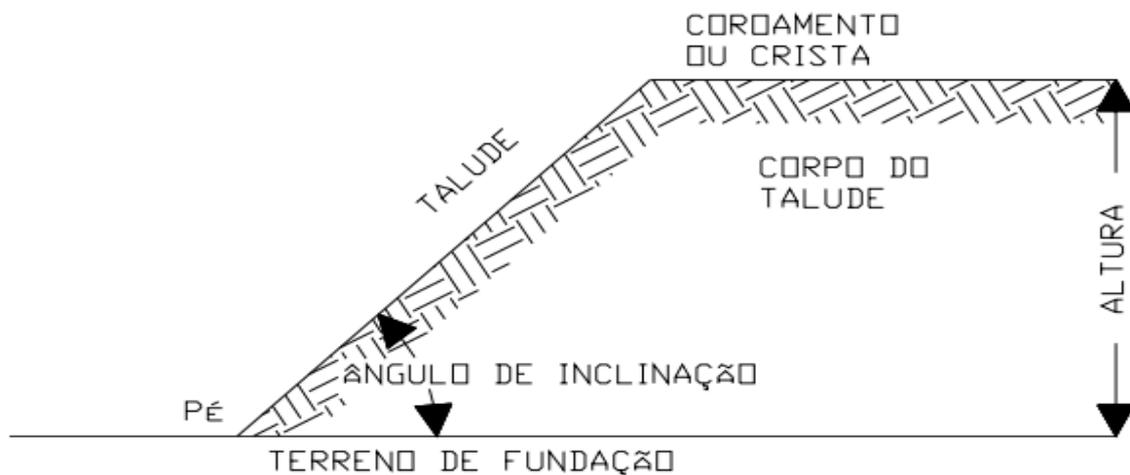
7.3.6 Análise da estabilidade de talude

Para a determinação do fator de segurança associado aos taludes do corpo do barramento, foram utilizados os parâmetros geométricos dos taludes, descritos a seguir.

7.3.6.1 Geometria do Talude

Conforme constatado no local, o talude apresenta uma altura de aproximadamente 3,00 metros. Desta forma, para a análise da estabilidade do talude será utilizada uma altura de 3,00 metros, pois esta seria a pior condição do local. A inclinação do talude, também varia, foi considerada a pior condição, 32° . Para melhor compreensão dos termos utilizados neste laudo, a figura 33 mostra a terminologia usualmente adotada.

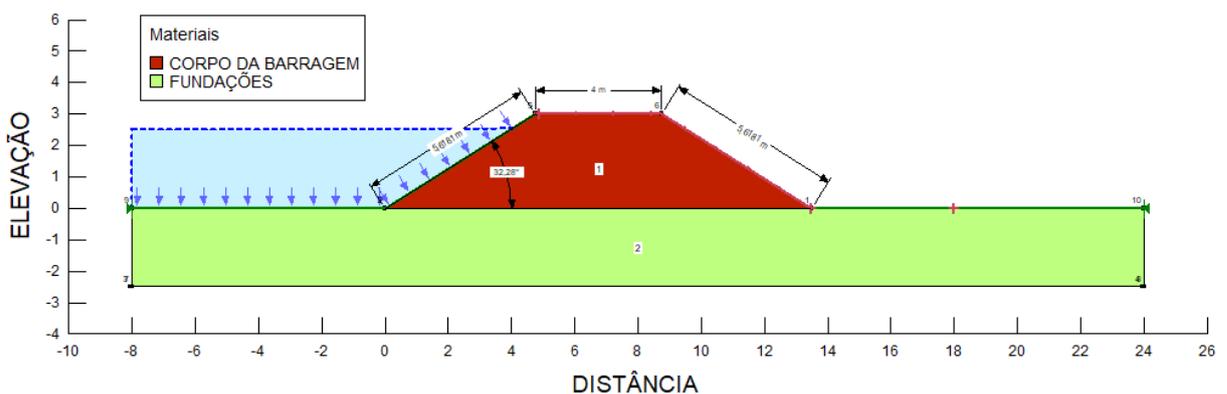
Figura 33 - Terminologia usualmente adotada para definir as geometrias do talude.



Fonte: Caputo (1988).

A figura 34 apresenta a geometria da barragem existente e utilizada para as simulações numéricas de estabilidade de taludes e também para análise de percolação de água no corpo da barragem.

Figura 34 - Geometria da barragem de terra estudada.



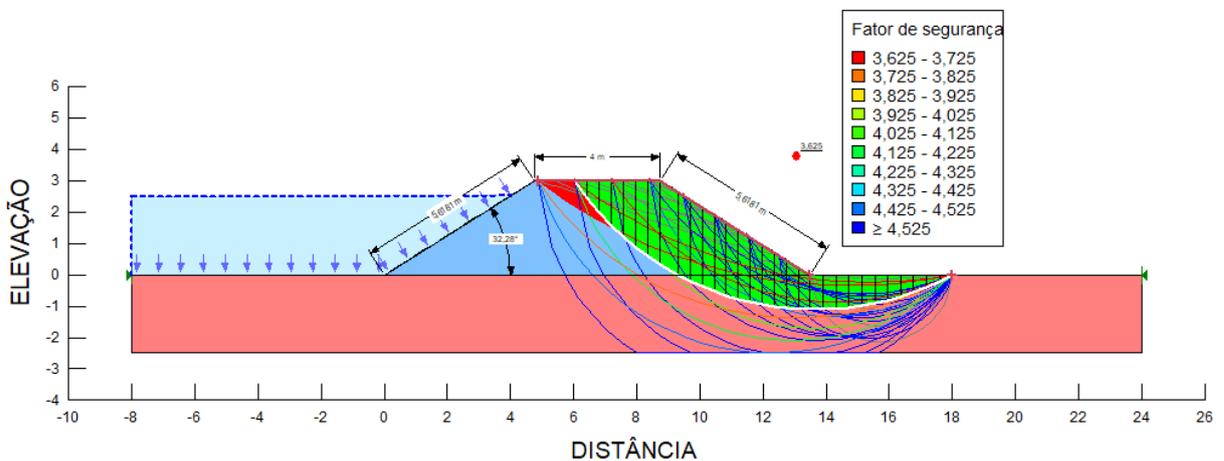
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

7.3.6.2 Determinação do fator de segurança

Por se tratar de programa de fácil utilização, não serão apresentados maiores detalhes ou rotinas de utilização para o programa SLOPE/W, versão estudantil. Porém antes de apresentar a resultante da análise salienta-se que o procedimento de análise de estabilidade utilizado foi o método proposto por BISHOP (1955) e JAMBU (1968).

A figura 35 apresenta a análise obtida pelo programa SLOPE/W para o método de Bishop. Verifica-se que o fator de segurança FS obtido é de 3.625.

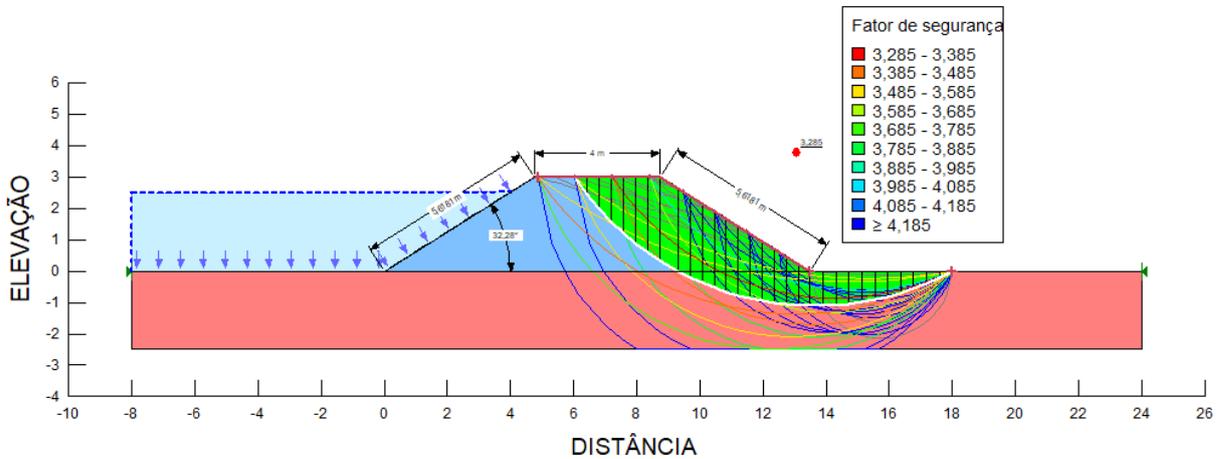
Figura 35 - Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado a barragem pelo método de Bishop.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A figura 36 apresenta a análise obtida pelo programa SLOPE/W para o método de Jambu. Verifica-se que o fator de segurança FS obtido é de 3.285.

Figura 36 - Modelo criado para a determinação do fator de segurança associado a barragem pelo método de Janbu.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

De acordo com a NBR (Norma Brasileira) 11682 (2006) os fatores de segurança encontrados apresentam-se com valores altos (até três vezes o valor de equilíbrio), ou seja, os riscos de segurança contra danos a vida humana e contra danos materiais e ambientais são baixos. A figura 37 apresenta a tabela da NBR 11682 (2006), a qual foi adotada como referência.

Figura 37 - Especificações do Fator de Segurança.

Grau de segurança Perdas de vidas	Grau de segurança			
	Alto	Média	Baixo	
Grau de segurança Perdas materiais e ambientais	Alto	1,5	1,4	1,3
	Médio	1,4	1,3	1,2 ^(*)
	Baixo	1,4	1,3	1,10 ^(*)

(*) A adoção de fatores de segurança iguais ou inferiores a 1,2 só será permitida quando os parâmetros de resistência do solo puderem ser confirmados por retroanálise, para as condições mais desfavoráveis de poro-pressões.

No caso de estabilidade de blocos rochosos os fatores de segurança podem ser parciais, incidindo sobre γ , ϕ , C' , em função da incerteza sobre estes parâmetros, devendo ser justificado pelo projetista. Deve-se também adotar um fator de segurança mínimo sobre o método de cálculo empregado, igual a 1,1

Fonte: Extraído de NBR 11682 (2006).

7.3.7 Condições de Permeabilidade da Barragem

Com finalidade de averiguar a segurança da BT da Universidade quanto aos problemas internos de percolação e permeabilidade de água, anteriormente citados

no item 5.2.2, foram delimitados os valores do gradiente hidráulico e o modelo de fluxo de água.

Após verificação dos materiais disponíveis para a execução do projeto, foram estabelecidas as diretrizes apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos materiais para o SEEP/W.

Identificação	K (m/s)	Material	Espessura
Solo do corpo da barragem	$1,00 \times 10^{-6}$	Argila siltosa	4,00 m
Solo de fundações	$1,00 \times 10^{-9}$	Rocha fragmentada	Variável

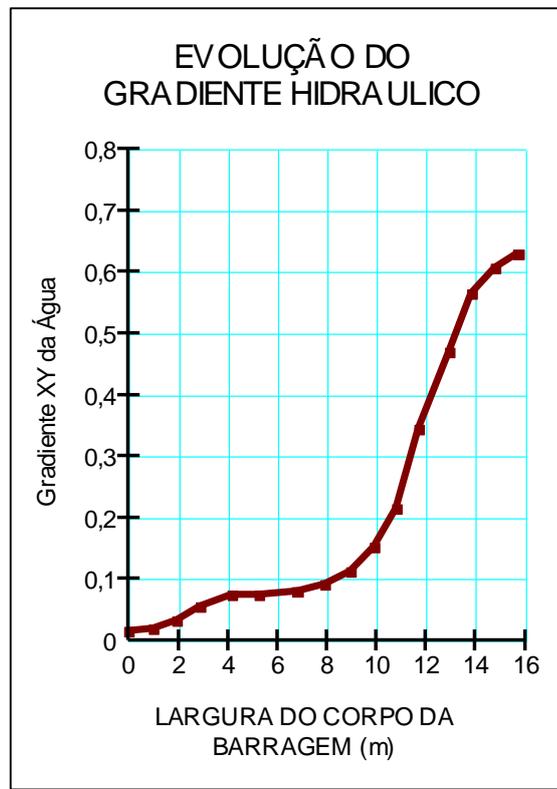
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na configuração do software SEEP/W a condutividade hidráulica foi determinada a não mudar com a pressão para ambos os solos. Todas as camadas de solo foram consideradas 100% saturadas independentemente da pressão.

7.3.7.1 *Gradiente Hidráulico*

Através da Figura 38, nota-se que o gradiente hidráulico máximo no pé do talude de jusante é de aproximadamente 0,62.

Figura 38 - Gráfico de velocidade de vazão vs largura da barragem.

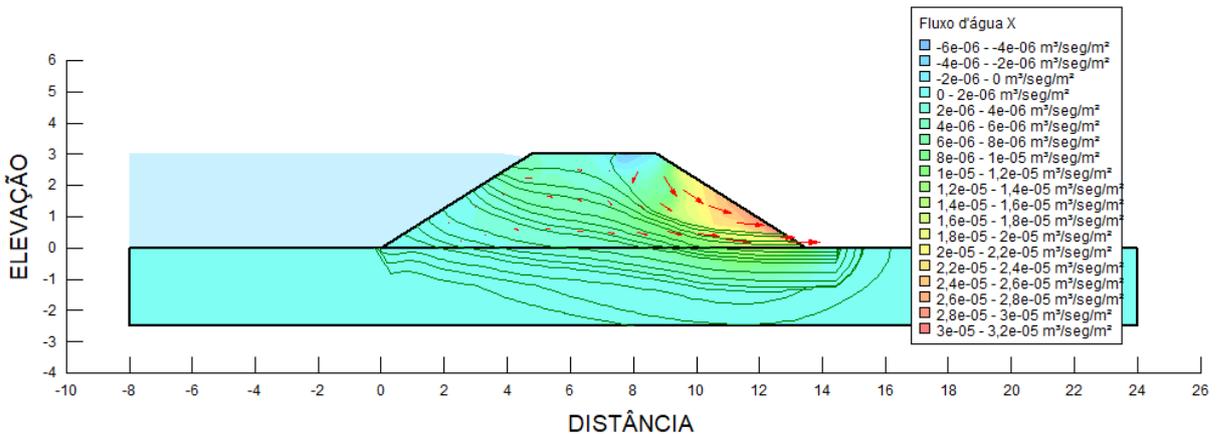


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na análise de segurança em barragens de terra interpreta-se que quando o gradiente hidráulico superar o gradiente hidráulico crítico (relação entre o peso específico submerso do solo e o peso específico da água), apresentando-se superior a 1, para a maioria dos solos e adotada neste estudo, acarretaria em pressões efetivas nulas em diferentes pontos do solo desencadeando processos erosivos (*pipping*) no interior da barragem. Desse modo, na prática, o valor de 0,62 do gradiente hidráulico máximo de saída não foi maior do que o valor crítico, demonstrando que a barragem não está sendo afetada por erosão interna.

7.3.7.2 Fluxo de água

Para averiguar o fluxo de água, de acordo com suas respectivas vazões no corpo da barragem, foi gerado um modelo de fluxo de água (Figura 39) utilizando também o programa SEEP/W e as condições padronizadas na tabela 4.

Figura 39 - Modelo de fluxo de água no solo e corpo da barragem.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O modelo ilustrado apresenta os valores de velocidade de fluxo de água (vazão) e os vetores de fluxo direcionais a partir do talude montante até o pé do talude de jusante. Logo, observa-se que o comportamento analisado entre os limites à montante e à jusante da estrutura, segue o padrão de escoamento normal no interior da barragem, no qual, a velocidade se inicia de maneira constante em direção ao talude de jusante e aumenta abruptamente a partir do mesmo, até a saída pelo pé do talude.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A associação entre as análises geológicas, geotécnicas e geofísicas, através das execuções de caracterização geológica-estrutural e pedológica, aferição do *checklist* de inspeção, levantamento eletrorresistivo e geração dos modelos de estabilidade de taludes e condições de permeabilidade, demonstrou ser uma ferramenta de monitoramento muito eficaz em projetos de barragens de terra. Contribui no desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de monitoramento otimizada e mais realista no que diz respeito aos problemas de segurança manifestados nesses tipos de barragens.

A complementação de todos os resultados foi satisfatória, visto que proporcionou uma análise e caracterização abrangente na barragem, atribuindo dados superficiais e subsuperficiais mais amplos, quando comparados somente com a utilização dos ensaios geotécnicos diretos (infiltração e SPT).

A caracterização geológica-pedológica e hidrográfica, evidenciaram as condições litológicas-estruturais do contexto de fundação da barragem, assim como a identificação do tipo de solo utilizado em sua construção e a compreensão hidrográfica da nascente que sustenta o reservatório da barragem.

Os produtos da inspeção geotécnica e a coleta dos dados N_{SPT} , se mostraram respectivamente importantes na definição dos possíveis locais irregulares e no fornecimento de parâmetros geotécnicos para a geração dos modelos computacionais de estabilidade de taludes e permeabilidade, além de sustentar a caracterização do solo evidenciada em campo.

As informações da aquisição em subsuperfície por meio da geofísica foram fundamentais para a identificação das zonas de menor resistividade (saturada) e o contexto geológico em profundidade, como por exemplo, os limites e as extensões laterais entre as camadas de solo e rocha, além das prováveis zonas de saturação inicial no corpo do barramento.

Por meio dos modelos de estabilidade de taludes e permeabilidade da barragem, tornou-se possível dimensionar os fatores de segurança associado as estruturas e definir o gradiente hidráulico, a direção e a quantidade do fluxo de água no interior da BT.

Através da correlação entre ambos os métodos foi possível avaliar que mesmo com a influência da zona saturada nos perfis geofísicos e em campo no pé do talude jusante, a barragem encontra-se segura com relação as suas estruturas e os possíveis problemas de infiltração, porém, propõe-se um monitoramento constante e o controle da presença de vegetação nos taludes, das condições do vertedouro e acompanhe os surgimentos de zonas de umidade anômalas na barragem nas diferentes épocas do ano.

Para um estudo mais aprofundado na barragem sugere-se a realização de mais análises geotécnicos de reconhecimento “in situ” das características mecânicas do tipo de solo utilizado na construção das estruturas, através de novos ensaios SPT, poços e trincheiras, reconhecimento das informações do contexto de fundação através de sondagens rotativas na camada impenetrável e ensaios de caracterização em laboratório, tais como, limite de liquidez, limite de plasticidade, granulometria, massa específica dos grãos e de compactação *Proctor* normal. Além da associação com

outros métodos geofísicos aplicados na identificação de estruturas e percolação de água em subsuperfície, como potencial espontâneo (SP).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-FARES, Walid. (2014). **Research Article Application of Electrical Resistivity Tomography Technique for Characterizing Leakage Problem in Abu Baara Earth Dam, Syria**. *International Journal of Geophysics*. 2014.

ALMEIDA, J. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentado - Solo dos Pampas**. Viçosa: Sociedade Brasileira Ciência do Solo, 1996. p. 288-306.

ARMELIN, J.L & FERREIRA, R. **Classificação das barragens**. Documento com slides de tópicos em Obras de terra. Goiás: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2013. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_barragens_02_classificacao_2013-2.pdf>. Acesso em 10 mai. 2018.

ASSIS, A. P.; HERNANDEZ, H. M.; COLMANETTI, J. P. **Apostila de Barragens**. Universidade de Brasília. 2003. 187 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **Estabilidade de Taludes**, Rio de Janeiro, 2006. NBR 11682.

Augusto Filho, O. e Virgili, J.C. **Estabilidade de Taludes**. 1998. In: Oliveira, A.M.S. e De Brito, S.N.A., *Geologia de Engenharia*. 1a ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 582 páginas. 1998.

BOSCOV, G. M. E. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Texto, 2008.

BISHOP, A. W. “The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes” **Geotechnique**, Vol 5, No. 1, 1955, pp 7-17.

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 (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6ª edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

CARVALHO, J. de A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. 153p

COSTA, N. M. N. C. (2012). **Projeto de taludes em solos - Aplicação do Eurocodigo 7**. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Uruguaiana: folha SH.21**. Brasília: CPRM, 2004. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

DÉCOURT, L. (1989). *The Standard Penetration Test. State of the Art Report*, XII ISSMFE, Rio de Janeiro, 6:2405-2416.

DYMINSKI, A. S., 2011. **Noções de Estabilidade de Taludes e Contenções**. Notas de Aula de Estabilidade de Taludes, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.

FERNANDES, C. E. de, 1984. **Fundamentos de Prospecção Geofísica**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 190p.

FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes** / Alberto Pio Fiori, Luigi Carmignani – 2ª Edição revisada e ampliada – Curitiba: Editora UFPR, 2009. 604p.

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: <<http://www.fao.org/docrep/014/ba0081p/ba0081p.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

GALLAS JDF. 2000. **Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. 174p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

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.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em

Recursos Minerais e Hidrogeologia, Departamento de Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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

GERSCOVICH, D. M. S. (2009). **Apostila Estabilidade de Taludes**. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

GODOY, N. S. **Fundações: Notas de Aula**, Curso de Graduação. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1972.

HOEK, E. & BRAY, J. W., 1974. **Rock Slope Engineering**. *Institution of Mining and Metallurgy*. 309 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistematização das Informações sobre Recursos Naturais. **Mapas de Geomorfologia, Geologia e Pedologia**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias>>. Acesso em: 20 maio. 2018.

IPT. 2011. **Levantamento geofísico e ensaios geotécnicos laboratoriais no maciço argiloso compactado da barragem principal, pertencente à barragem de contenção de rejeitos do palmital, município de Alumínio (SP)**. RELATÓRIO TÉCNICO No 122.567-205, 41p.

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

KIM, J.H., Yi, M.J., Song, Y., Seol, S.J., Kim, K.S., 2007. **Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam**. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*.12 (2), 221–235.

LAMBE, T., W. 1958. **The structure of compacted clay**. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 84(SM2).

LAMBE, T. W., WITHMANN, R. V. **Soil Mechanics, SI version**. New York: John Wiley & Sons INC. 553p. 1996.

LOKE, M. H. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys**, 2000.

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 mai. 2018.

MARTINS, Laura Costa; WILDNER, Wilson; HARTMANN, Léo Afraneo. **Estratigrafia dos derrames da Província Vulcânica Paraná na região oeste do Rio Grande do Sul, Brasil, com base em sondagem, perfilagem gamaespectrométrica e geologia de campo**. Pesquisas em Geociências, Porto Alegre, v. 38, n. 1, p. 15-27, out. 2011.

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

MEIRELLES, F. S. C. **Curso de segurança de barragens**. Agência Nacional de Águas, 2007. Disponível em: <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf>. Acesso em 8 mai. 2018.

PICCIRILLO, E.M. & MELFI, A.J. 1988. **The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects**. IAG-USP, *in press*.

PREFEITURA MUNICIPAL DE URUGUAIANA. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Uruguaiana: PMSB, 2005. Disponível em: <http://www.uruguaiana.rs.gov.br/pmu_novo/admin/files/leisdecretos/dec540-2014-pmsb.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2018.

RAGAN, Donal M. **Structural geology: an introduction to geometrical techniques**. 4. ed. Cambridge University Press, 2009.

SCHERER, C.M.S. 2002. **Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of Paraná Basin, Southern Brazil**. *Sedimentology*, 49: 97-116.

SILVA, A. F. P. (2010). **Desenvolvimento de um Programa de Cálculo Automático de Estabilidade de Taludes pelo Método de Correia**. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.

SILVA, V. C. **Métodos Analíticos para Avaliar a Contribuição de Estacas para o Fator de Segurança de Taludes – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.**

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.

STRUFALDI, Elieni Guimarães Barbosa. **Retroanálise probabilista: aplicação prática de análise de percolação em uma barragem de terra.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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

WILDNER, W., Lopes, R.C., Romanini, S. & Camozzato, E. 2003. **Contribuição à estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná.** *In: I ENCONTRO SOBRE A ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDO E BACIAS*, 2003, Porto Alegre. Hartmann, L.A. (ed.), p. 204-210.