



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE
DE BARRAGENS DE TERRA

Marina Mendes Coura

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

MARINA MENDES COURA

APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro - SP

2019

C858a Coura, Marina Mendes
Aplicação de métodos geoeletricos para análise da
estabilidade de barragens de terra / Marina Mendes
Coura. -- Rio Claro, 2019
111 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências
Exatas, Rio Claro
Orientador: César Augusto Moreira

1. Barragem. 2. Geofísica. 3. Eletrorresistividade. 4.
Polarização Induzida. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca
do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARINA MENDES COURA

APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Moreira – Orientador
Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e
Ciências Exatas – UNESP, Campus de Rio Claro

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho
Departamento de Geologia Aplicada / Instituto de Geociências e
Ciências Exatas – UNESP, Campus de Rio Claro

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis
Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e
Ciências Atmosféricas – USP, São Paulo

Resultado: Aprovada

Rio Claro/SP, 05 de abril de 2019

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Mônica e José Celso, à minha irmã, Laura, e à minha avó, Célia, por todo o apoio e incentivo durante a graduação e o mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira, pela ajuda, ensinamentos e toda orientação durante o mestrado.

Ao Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, coordenador do projeto FAPESP, por toda ajuda e ensinamento.

Ao técnico Alan, pela ajuda durante a realização dos ensaios de permeabilidade do solo.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento do projeto “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos geoeletricos e sísmicos” (Processo: 16/18080-9).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus melhores amigos Flávia Demarchi, Rodrigo Beluco e Renata Paes por todos os momentos de descontração, conversas e ajuda durante todos esses anos.

RESUMO

Barragens são estruturas construídas com o intuito de criação de um reservatório para represamento de água ou rejeito. A construção de uma barragem deve ser feita de maneira cuidadosa, pois são estruturas que represam uma grande quantidade de água ou rejeito, e problemas nas obras de engenharia, localização imprópria ou falhas na execução do projeto pode vir a causar acidentes e rupturas na estrutura. A principal causa das rupturas e acidentes estão associados à erosão interna (piping) e galgamento (overtopping). Portanto, é fundamental que as barragens sejam monitoradas para que seja possível a garantia da segurança da estrutura. O estudo apresenta resultados da aplicação conjunta dos métodos geofísicos geoeletricos da Eletroresistividade e Polarização Induzida integrados com o método geotécnico de permeabilidade do solo através do Permeômetro de Guelph em duas barragens de terra na zona rural dos municípios de Cordeirópolis e Ipeúna (SP). A barragem de Cordeirópolis é caracterizada por solo laterítico argiloso proveniente das rochas básicas da Formação Serra Geral. A barragem de Ipeúna está situada em uma área de afloramento de diamictitos argilosos e sedimentos silto-arenosos do Grupo Itararé. Em cada barragem foram realizadas 2 linhas de tomografia elétrica com os arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner, e com espaçamento entre eletrodos de 2 metros. Foram realizados 12 ensaios geotécnico de permeabilidade do solo, com 6 furos de 50 cm de profundidade em cada barragem. Os resultados geofísicos são apresentados em seções geofísicas 2D com valores de resistividade e cargabilidade. As zonas de baixa resistividade elétrica foram identificadas como zonas saturadas e de possível infiltração de água nas barragens de terra. O método da Polarização Induzida não apresentou resultados satisfatórios para a identificação de zonas de infiltração nas barragens, porém, como a aquisição é conjunta, é considerado um método para complementação do estudo. Os resultados geotécnicos apontam que o solo apresenta baixa permeabilidade, portanto, são considerados bons para a composição do corpo da barragem.

Palavras-chave: Barragens, Geofísica, Eletroresistividade, Polarização Induzida, Infiltração.

ABSTRACT

Dams are structures built with purpose of creating a reservoir for damming water or tailings. The construction of a dam must be made with careful, as it's a structure that dam a large amount of water or tailing, and engineering problems, improper location or failures in projects execution can lead to accidents and ruptures in the dam structure. The main cause of ruptures and accidents are associated with piping and overtopping. Therefore, it's essential that dams are monitored so that the structure safety can be guaranteed. This study presents results of the joint application of geophysical methods of Electrical Resistivity and Induced Polarization, integrated with geotechnical method of soil permeability using the Guelph Permeameter in two earth dams in the rural area of Cordeiropolis and Ipeuna (SP). The Cordeiropolis dam is characterized by clayey lateritic soil from basic rocks of Serra Geral Formation. The Ipeuna dam is located in an outcrop area of clayey diamictites and silt-sandy sediments of Itarare Group. In each dam two electrical tomography lines were acquired using Schlumberger, Dipole-dipole and Wenner arrays and with electrode spacing of 2 meters. Twelve geotechnical tests of soil permeability were performed, with 6 holes of 50 centimeters depth in each dam. The geophysical results are presented in 2D geophysical sections with resistivity and chargeability. The low electrical resistivity zones were identified as saturated and possible water infiltration zones in the earth dams. The Induced Polarization didn't present satisfactory results for identifying infiltration zones in the dams, however, since the acquisition is made in a joint way, the method is used to complement the study. The geotechnical results indicate that the soil presents low permeability, therefore, they are considered good for the body composition of the dam.

Key-words: Dams, Geophysics, Electrical Resistivity, Induced Polarization, Infiltration.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Mapa de localização das barragens de terra.....	16
Figura 2.2 – (A) Localização da Bacia do Paraná na América do Sul; (B) Unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.....	17
Figura 2.3 – Mapa geológico local com a localização das barragens de terra.....	19
Figura 2.4 – (A) Bloco de basalto no entorno da barragem; (B) Blocos localizados dentro da vala, setor Sul da barragem.	20
Figura 2.5 – (A) Afloramento de diamictito próximo a barragem; (B) Seta vermelha indicando o grânulo do diamictito.....	21
Figura 2.6 – Gráfico de temperatura média mensal.....	22
Figura 2.7 – Gráfico de precipitação.....	23
Figura 2.8 – Mapa pedológico local com a localização das barragens.	24
Figura 2.9 – Área ao entorno da barragem utilizada para plantio de cana-de-açúcar.	25
Figura 2.10 – Pesqueiro Quilombo (direita) e seu reservatório utilizado para pesca recreativa.	25
Figura 3.1 – (A) Barragem de terra homogênea; (B) Barragem de terra zonada.	28
Figura 3.2 – (A) Barragem de enrocamento com núcleo impermeável; (B) Barragem de enrocamento com face impermeável.....	29
Figura 3.3 – (A) Barragem de concreto de gravidade; (B) Barragem de concreto de gravidade aliviada.....	30
Figura 3.4 – (A) Barragem de concreto em arco; (B) Barragem arco simples; (C) Barragem arcos múltiplos.....	30
Figura 3.5 – Evolução do cadastro em relação ao uso principal.	33
Figura 3.6 – Barragens enquadradas na PNSB com empreendedor identificado, por uso principal.....	34
Figura 3.7 – Acidentes e incidentes ocorridos anualmente após a implantação do Plano Nacional de Segurança de Barragens – PNSB.....	35
Figura 3.8 – Formação de <i>piping</i> por erosão regressiva.....	36

Figura 3.9 – Formação de <i>piping</i> a partir da existência de trincas.....	36
Figura 3.10 – Formação de <i>piping</i> a partir do carreamento de finos.	37
Figura 3.11 – Regime de fluxo hidráulico e as zonas de erosão.	38
Figura 3.12 – Sequência erosiva gerada por galgamento (<i>overtopping</i>) em barragem de enrocamento com núcleo impermeável.....	40
Figura 3.13 – Sequência erosiva gerada por galgamento (<i>overtopping</i>) em barragem homogênea com materiais coesivos.	41
Figura 3.14 – Sequência erosiva gerada por galgamento (<i>overtopping</i>) em barragem homogênea com materiais coesivos com elementos granulares.	41
Figura 4.1 – Propagação do campo elétrico em meio isotrópico e tridimensional, por meio da associação de quatro eletrodos.	47
Figura 4.2 – Parâmetros utilizados na definição de resistividade.....	48
Figura 4.3 – Mecanismos de Polarização Induzida: (A) polarização de membrana; (B) polarização eletrônica.	49
Figura 4.4 – Procedimento de medição do método IP no domínio do tempo.....	51
Figura 4.5 – Arranjo Schlumberger e cálculo da resistividade aparente.	52
Figura 4.6 – Arranjo Dipolo-dipolo e cálculo da resistividade aparente.....	53
Figura 4.7 – Esquema de aquisição com o arranjo Dipolo-dipolo.	53
Figura 4.8 – Arranjo Wenner e cálculo da resistividade aparente.	54
Figura 4.9 – Esquema do experimento de Henry Darcy.	55
Figura 4.10 – Valores do coeficiente de permeabilidade (k).	56
Figura 4.11 – Viscosidade da água em função da temperatura.	58
Figura 4.12 – (A) Esquema do permeâmetro de Guelph; (B) Permeâmetro de Guelph durante ensaio.....	59
Figura 5.1 – Localização das linhas de aquisição de dados geofísicos na barragem de Ipeúna – SP.	61
Figura 5.2 – Localização das linhas de aquisição de dados geofísicos na barragem de Cordeirópolis – SP.	61
Figura 5.3 – Localização da linha 1, próxima à montante da barragem de Cordeirópolis.	62

Figura 5.4 – (A, B) Resistivímetro ABEM Terrameter LS sendo utilizado na aquisição de dados geofísicos.	63
Figura 5.5 – (A) Eletrodos conectados ao cabo de transmissão. (B) Eletrodo não polarizável com base porosa, fixado em uma pequena cova no chão. (C) Solução supersaturada de CuSO ₄	64
Figura 5.6 – Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Ipeúna.	65
Figura 5.7 – Trados utilizados para realização dos furos para ensaios de permeabilidade.	65
Figura 5.8 – Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Cordeirópolis.	66
Figura 5.9 – (A) Preenchimento dos reservatórios com água. (B) Permeâmetro pronto para realização do ensaio.	67
Figura 5.10 – Leitura e anotação das medidas de variação de nível d'água durante o ensaio de permeabilidade de solo.	68
Figura 7.1 – Seções de resistividade para linhas 1 e 2 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.	72
Figura 7.2 – Seções de cargabilidade para linhas 1 e 2 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.	74
Figura 7.3 – Seções de resistividade para linhas 1 e 2 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.	77
Figura 7.4 – Seções de cargabilidade para linhas 1 e 2 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.	79
Figura 8.1 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) da barragem de Cordeirópolis. O retângulo indica a área de alta resistividade onde há uma vala com blocos de basalto.	82
Figura 8.2 – Seções de resistividade para linhas 1, 2 e 3 na barragem de Cordeirópolis.	84
Figura 8.3 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) da barragem de Ipeúna. O retângulo indica a localização do vertedouro que liga os dois reservatórios.	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Faixa de valores de resistividade elétrica para diferentes materiais e tipos litológicos.	46
Tabela 4.2 – Influência da fração que passa na peneira 100 na permeabilidade de filtros de agregado lavado	57
Tabela 7.1 – Valores de permeabilidade do solo da barragem de Cordeirópolis.....	75
Tabela 7.2 – Valores de permeabilidade do solo para barragem de Ipeúna.	80
Tabela 8.1 – Relação dos valores de condutividade hidráulica e tipos de materiais.	83
Tabela 8.2 – Comparação entre arranjos utilizados na aquisição de dados geofísicos.	87
Tabela 8.3 – Comparação dos dados das barragens.	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Apresentação e justificativas.....	14
1.2	Objetivos.....	15
2	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	16
2.1	Áreas de estudo	16
2.2	Contexto geológico	16
2.2.1	Geologia regional.....	16
2.2.1.1	Grupo Itararé	18
2.2.1.2	Formação Serra Geral	18
2.2.2	Geologia local	19
2.2.2.1	Barragem de Cordeirópolis	19
2.2.2.2	Barragem de Ipeúna.....	20
2.3	Contexto geomorfológico	21
2.4	Clima	21
2.5	Contexto pedológico	23
2.6	Uso e ocupação da terra.....	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	Barragens de regularização	26
3.1.1	Barragens de contenção.....	27
3.2	Tipos de barragens.....	27
3.2.1	Barragens de terra.....	27
3.2.2	Barragens de enrocamento.....	29
3.2.3	Barragens de concreto.....	29
3.2.4	Barragens mistas	30
3.3	Legislação de segurança de barragens	31
3.3.1	Dados estatísticos sobre barragens no Brasil.....	32
3.4	Problemas relacionados às barragens	35
4	METODOLOGIA EMPREGADA.....	43
4.1	Geofísica aplicada no estudo de barragens	43

4.2	Métodos geofísicos.....	45
4.2.1	Propriedades elétricas dos materiais.....	45
4.2.2	Método da Eletrorresistividade.....	47
4.2.3	Método da Polarização Induzida.....	49
4.2.4	Técnicas e arranjos.....	51
4.2.4.1	Tomografia elétrica.....	51
4.2.4.2	Arranjo Schlumberger.....	52
4.2.4.3	Arranjo Dipolo-dipolo.....	52
4.2.4.4	Arranjo Wenner.....	54
4.3	Permeabilidade do solo.....	54
4.3.1	Fatores que influenciam a permeabilidade.....	56
4.3.1.1	Permeâmetro de Guelph.....	59
5	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	60
5.1	Dados geofísicos.....	60
5.2	Dados geotécnicos.....	64
6	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	69
7	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	71
7.1	Barragem de Cordeirópolis.....	71
7.1.1	Resultados geofísicos.....	71
7.1.1.1	Eletrorresistividade.....	71
7.1.1.2	Polarização Induzida.....	73
7.1.2	Resultados geotécnicos.....	75
7.2	Barragem de Ipeúna.....	76
7.2.1	Resultados geofísicos.....	76
7.2.1.1	Eletrorresistividade.....	76
7.2.1.2	Polarização Induzida.....	78
7.2.2	Resultados geotécnicos.....	80
8	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO.....	81
8.1	Barragem de Cordeirópolis.....	81
8.2	Barragem de Ipeúna.....	84
8.3	Comparação dos arranjos.....	87

8.4	Comparação das barragens.....	88
9	CONCLUSÃO	90
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e justificativas

Barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de retenção de água, rejeitos, detritos, com a finalidade de armazenamento ou controle. Variam de tamanho, desde pequenos maciços de terra até grandes estruturas de concreto ou de aterro. Apresenta diversas finalidades de armazenamento de água para abastecimento da população, geração de energia hidrelétrica, controle de cheias, irrigação, entre outros.

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens 2016, publicado pela Agência Nacional de Águas – ANA (2017), até o final do ano de 2016 foram cadastradas 11.156 barragens de usos múltiplos, representando 92% das barragens cadastradas no país. O mesmo relatório afirma que as barragens de usos múltiplos são majoritariamente de terra. Mesmo que as barragens de terra sejam o tipo mais comum entre as de pequeno porte, ainda podem haver problemas estruturais em sua construção (CULLEN, 1964).

Os problemas associados a barragens são frequentes e os acidentes e rupturas são os mais comuns nessa área. Geralmente, esses problemas estão associados ao aumento da vazão, causado por eventos meteorológicos. Segundo Perini (2009), no período de 2000 a 2008 foram registrados 140 casos no Brasil, sendo que metade foram causados por ruptura. O motivo mais frequente para ocorrência de acidentes e ruptura é a erosão interna (*piping*) (LADEIRA, 2007). Portanto, é fundamental o monitoramento das barragens para garantir a segurança das estruturas, buscando evidências de deslocamento, rachaduras, sumidouros, erosão, entre outros.

Nos últimos quatro anos ocorreram os maiores acidentes envolvendo barragens já registrados no Brasil. Em 2015, a barragem de rejeito da Mineradora Samarco S/A rompeu e causou um grande impacto ambiental, além de ocasionar a morte de 19 pessoas. Dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (2015) atestam que cerca de 34 milhões de metros cúbicos de rejeito, composto principalmente por óxido de ferro e sílica, foram lançados no meio ambiente. Os poluentes percorreram 44 km no rio Gualaxo do Norte até o rio do Carmo, e outros 22 km até o rio Doce. Em janeiro de 2019, a barragem da mina Córrego do Feijão rompeu e gerou grandes impactos ambientais, além de ser

considerado o maior acidente de trabalho já registrado no país. O número de vítimas chegou a 166 pessoas, além de 144 que ainda estão desaparecidas. Com todos esses acidentes em um pequeno período de tempo é necessário reforçar a importância de estudos e monitoramentos nessas estruturas, pois os acidentes causam danos irreparáveis à população e meio ambiente.

A geofísica é o ramo das Ciências da Terra responsável pelo estudo das propriedades físicas da Terra. A utilização dos métodos geofísicos é uma alternativa rápida, indireta e de baixo custo para obtenção de informações de subsuperfície. O método da Eletrorresistividade é utilizado no estudo e reconhecimento de descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

No presente trabalho foram investigadas as estruturas de duas barragens de terra para determinar eventuais zonas de infiltração, com o uso dos métodos geofísicos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida.

As justificativas para escolha do tema do projeto são:

- Ocorrência frequente de problemas associados a barragens, principalmente por infiltração e *piping*;
- O emprego dos métodos geofísicos geoeletricos para obtenção de dados permite uma avaliação adequada, rápida, de baixo custo e de forma indireta, sem causar danos a estrutura das barragens;
- Existência de poucos trabalhos na literatura sobre a utilização do método geofísico da Polarização Induzida aplicado à barragens.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da pesquisa é o reconhecimento de estruturas de fluxo e eventuais zonas de fraqueza no interior de duas barragens de terra, compostas por litologias diferentes, a partir da aplicação dos métodos geofísicos geoeletricos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida.

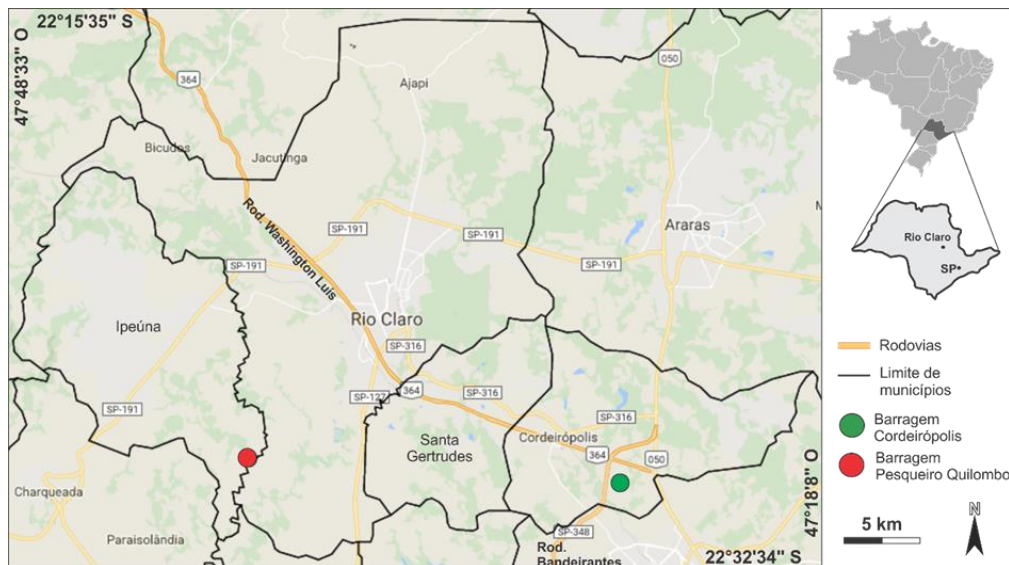
Um segundo objetivo é a análise da permeabilidade dos solos utilizados para construção das barragens a partir de ensaios geotécnicos com o permeâmetro de Guelph.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

2.1 Áreas de estudo

As barragens de terra do presente estudo estão localizadas no interior do Estado de São Paulo (Figura 2.1). Uma delas está localizada na zona rural do município de Cordeirópolis, situada a 161 km da cidade de São Paulo. Pode ser acessada por uma estrada de terra próxima a empresa Karina Pisos e Revestimentos Cerâmicos Ltda., ao lado da Rodovia Washington Luís (SP-316). A outra barragem está localizada na zona rural do município de Ipeúna, dentro do Pesqueiro Quilombo. Seu acesso pode ser feito pela estrada rural que liga a cidade de Ipeúna a Rio Claro. O município de Ipeúna está localizado a 195 km da cidade de São Paulo.

Figura 2.1 – Mapa de localização das barragens de terra.



Fonte: Modificado de Google Maps, 2017.

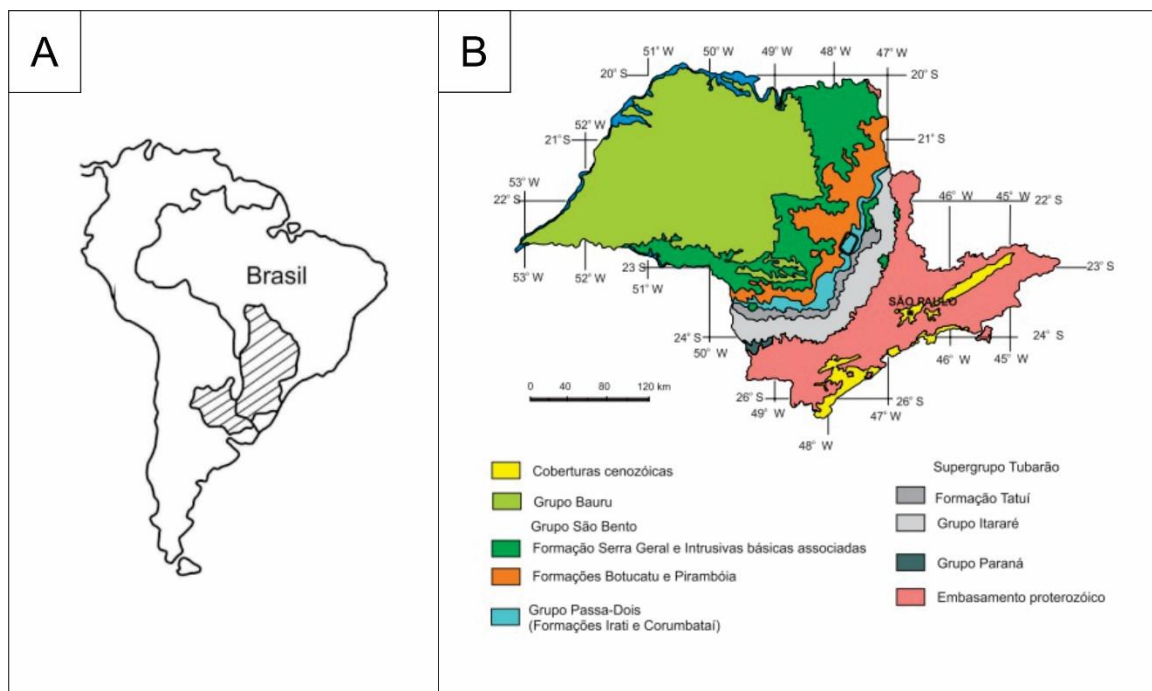
2.2 Contexto geológico

2.2.1 Geologia regional

A área de estudo está localizada na Bacia do Paraná. Trata-se de uma bacia intracratônica e simétrica localizada na região centro-leste da América do Sul e

abrange uma área de cerca de 1.600.000 km². O território brasileiro apresenta 1.000.000 km², atingindo espessura de 6.000 metros, sendo 160.000 km² no Estado de São Paulo (SCHNEIDER et al, 1974; ZAINÉ, 1994). No território paulista é composta por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica (Figura 2.2).

Figura 2.2 – (A) Localização da Bacia do Paraná na América do Sul; (B) Unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.



Fonte: (A) Modificado de SCHNEIDER et al., 1974; (B) IPT, 1981.

A bacia apresenta formato alongado, segundo a direção NNE-SSW, e possui preenchimento predominantemente siliciclástico, coberto com derrame de lavas basálticas. Os sedimentos foram depositados em, no mínimo, três ambientes tectônicos durante o tectonismo e evolução do Gondwana (ZALÁN et al., 1990). Apresenta seis sequencias deposicionais separadas por discordâncias no topo e base, sendo elas: Sequencia Ordovício-Siluriana, Sequencia Devoniana, Sequencia Carbonífera-Eotriássica, Sequencia Neotriássica, Sequencia Jurássica-Eocretácea e Sequencia Neocretácea (MILANI et al., 1994).

2.2.1.1 Grupo Itararé

O Grupo Itararé é a unidade mais expressiva da Bacia do Paraná. É formado por rochas de idade permocarbonífera, apresenta espessura superior a 1000 metros na porção central da bacia, que se adelgaça em direção às bordas norte e sul (FRANÇA; POTTER, 1988).

É composto por arenitos de granulometria variada, desde finos a conglomeráticos, maciços ou estratificados, siltitos argilosos, diamictitos com matriz silto-arenosa e ritmitos (alternância de lâminas de siltito ou arenito fino com folhelhos) (SCHNEIDER et al., 1974; SAAD, 1977). No Estado de São Paulo, o arenito é a rocha predominante no Grupo Itararé. A deposição dos sedimentos do Grupo Itararé ocorreu em paleoambientes deposicionais flúvio-deltaicos a marinhos plataformais, sob influência glacial e tectônica ativa, refletida em subsidências e soerguimento no interior e próximo à bacia.

No Estado de São Paulo, a base do Grupo Itararé está em contato com rochas cristalinas pré-silurianas, em uma superfície de erosão. No topo, tem contato discordante com a Formação Tatuí (SOUSA, 2002). A presença de fósseis no Grupo Itararé é pequena, apresentando registros mais frequentes de fósseis vegetais, ocorrendo em menor escala lamelibrânquios, gastrópodos e braquiópodos, associados à fácies marinhas (ZAINÉ, 1994).

2.2.1.2 Formação Serra Geral

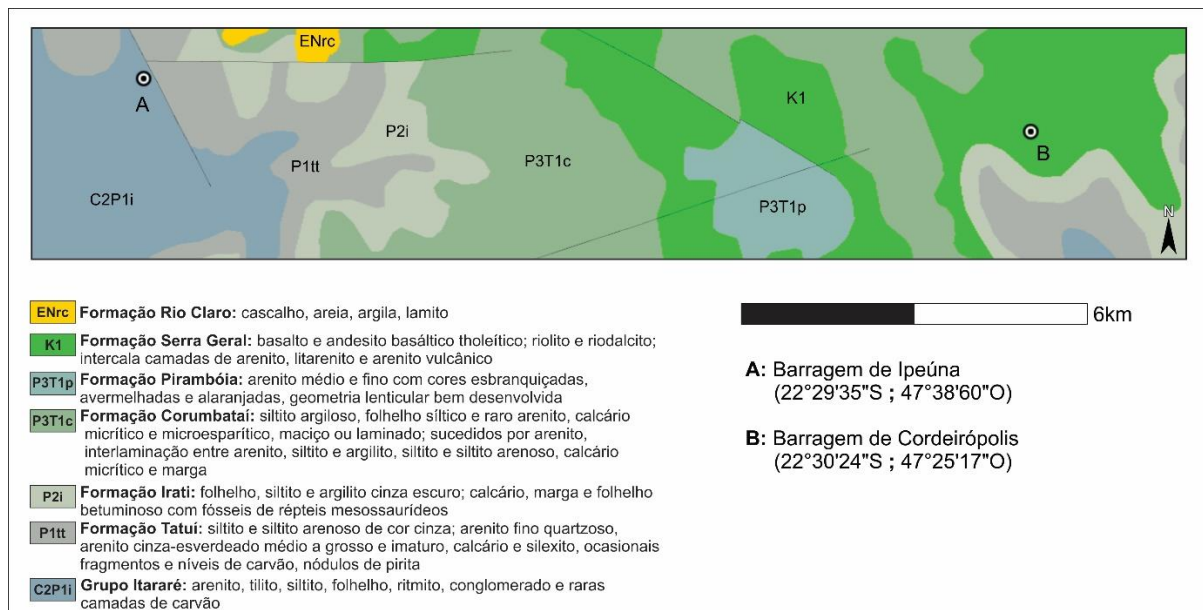
A Formação Serra Geral é constituída por sequência de derrames de lavas basálticas, com intercalações de lentes e camadas arenosas. Apresenta composição toleítica, de textura afanítica, com coloração cinza a preta, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais (SCHNEIDER et al., 1974). As intercalações de arenitos finos a médios ocorrem principalmente na parte basal, apresentam estratificação cruzada tangencial, idênticas aos da Formação Botucatu. O contato da Formação Serra Geral com os arenitos da Formação Botucatu é discordante. Com as unidades mais antigas, o contato é marcado por discordância erosiva. O contato superior com a Formação Bauru também é discordante.

Na Bacia do Paraná, a formação apresenta ocorrência generalizada. A maior espessura registrada (1529 metros) foi encontrada em um poço, perfurado pela Petrobrás, no município de Presidente Epitácio – SP. A partir de datações radiométricas, a idade principal do vulcanismo da Formação Serra Geral foi definida no intervalo do Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior (SCHNEIDER et al., 1974).

2.2.2 Geologia local

A Figura 2.3 apresenta o mapa geológico local com a localização das barragens. A barragem de Cordeirópolis, representada pela letra B no mapa, foi construída em uma área onde aflora a Formação Serra Geral; já a barragem de Ipeúna, representada pela letra A no mapa, está localizada em uma região onde aflora o Grupo Itararé.

Figura 2.3 – Mapa geológico local com a localização das barragens de terra.



Fonte: Modificado de CPRM, 2006.

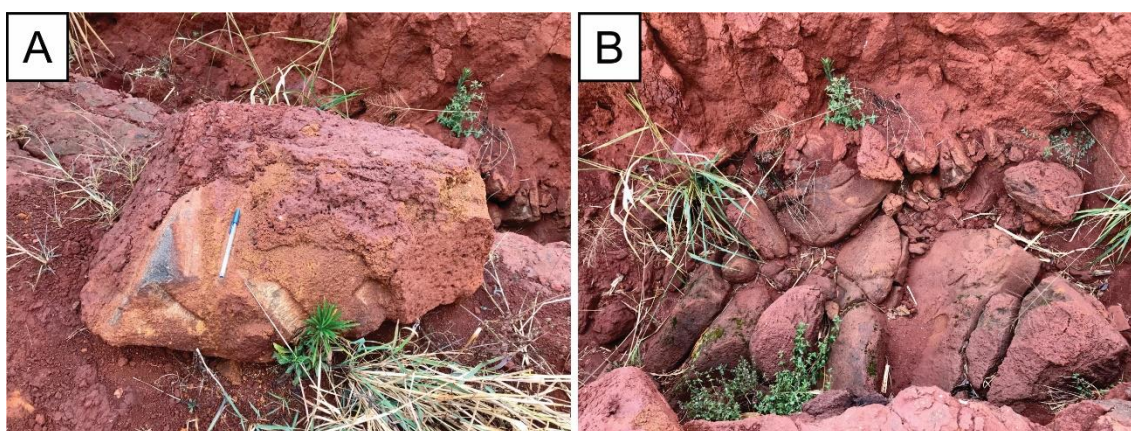
2.2.2.1 Barragem de Cordeirópolis

A barragem de Cordeirópolis é caracterizada por solo laterítico argiloso, de coloração marrom avermelhada a marrom amarelado, proveniente de rochas básicas da Formação Serra Geral.

Durante o trabalho de campo de reconhecimento foi possível observar a presença de blocos e matacões de basalto nos arredores do barramento. No setor Sul da barragem há uma vala, de aproximadamente 2 metros de profundidade, onde há uma maior concentração de blocos (Figura 2.4).

Em relação ao uso e ocupação da terra, a área próxima à barragem é utilizada para o plantio da cana-de-açúcar.

Figura 2.4 – (A) Bloco de basalto no entorno da barragem; (B) Blocos localizados dentro da vala, setor Sul da barragem.



Fonte: Arquivo pessoal.

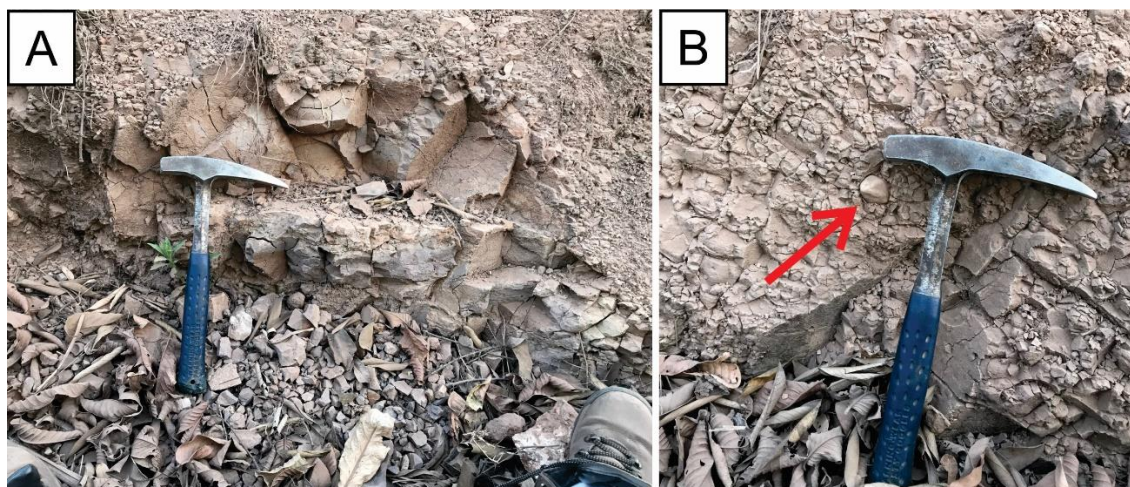
2.2.2.2 Barragem de Ipeúna

A litologia presente na barragem de Ipeúna pertence ao Grupo Itararé. No setor oeste da área foi possível encontrar afloramentos de diamictitos argilosos, de coloração marrom clara com presença de grânulos de aproximadamente 5 centímetros (Figura 2.5).

Do lado oposto, a leste, é possível observar uma mudança de litologia, com a presença de sedimentos silto-arenosos, também de coloração marrom clara.

A barragem está localizada entre dois reservatórios de água, que fazem parte do estabelecimento “Pesqueiro Quilombo. O reservatório localizado no setor sul da barragem é utilizado para pesca recreativa.

Figura 2.5 – (A) Afloramento de diamictito próximo a barragem; (B) Seta vermelha indicando o grânulo do diamictito.



Fonte: Arquivo pessoal.

2.3 Contexto geomorfológico

A geomorfologia do Estado de São Paulo é dividida em cinco províncias: Planalto Atlântico, Província Costeira, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental (ALMEIDA, 1964).

No contexto geomorfológico, as áreas de estudo estão localizadas na Depressão Periférica Paulista. A morfologia da Depressão Periférica Paulista é dividida em três unidades morfológicas: Zona do Médio Tietê, Zona do Paranapanema e Zona do Mogi-Guaçu (IPT, 1981).

A Depressão Periférica da Borda Leste da Bacia do Paraná está esculpida nos sedimentos paleozoicos e mesozoicos da bacia, com predominância do relevo de colinas de topos amplos, uma densa rede de drenagem e declividades baixas a moderadas. A Zona do Médio Tietê apresenta altitudes que variam entre 600 e 750 metros e são consideradas as maiores altitudes encontradas nas proximidades das escarpas de frente das cuestas (ROSS; MOROZ, 1997).

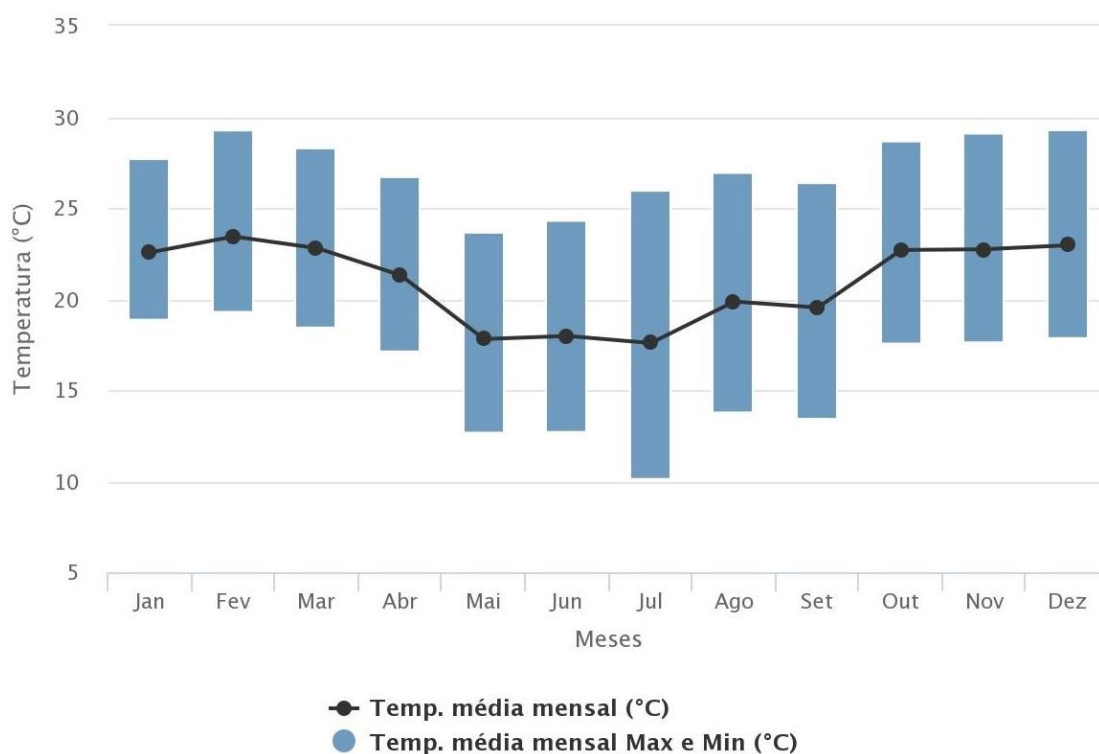
2.4 Clima

As cidades de Cordeirópolis e Ipeúna apresentam um clima subtropical úmido, classificado como “Cwa” de acordo com a classificação de Köppen e Geiger. O clima

é caracterizado por invernos secos com temperaturas inferiores a 18°C e verões quentes com temperaturas superiores a 22°C.

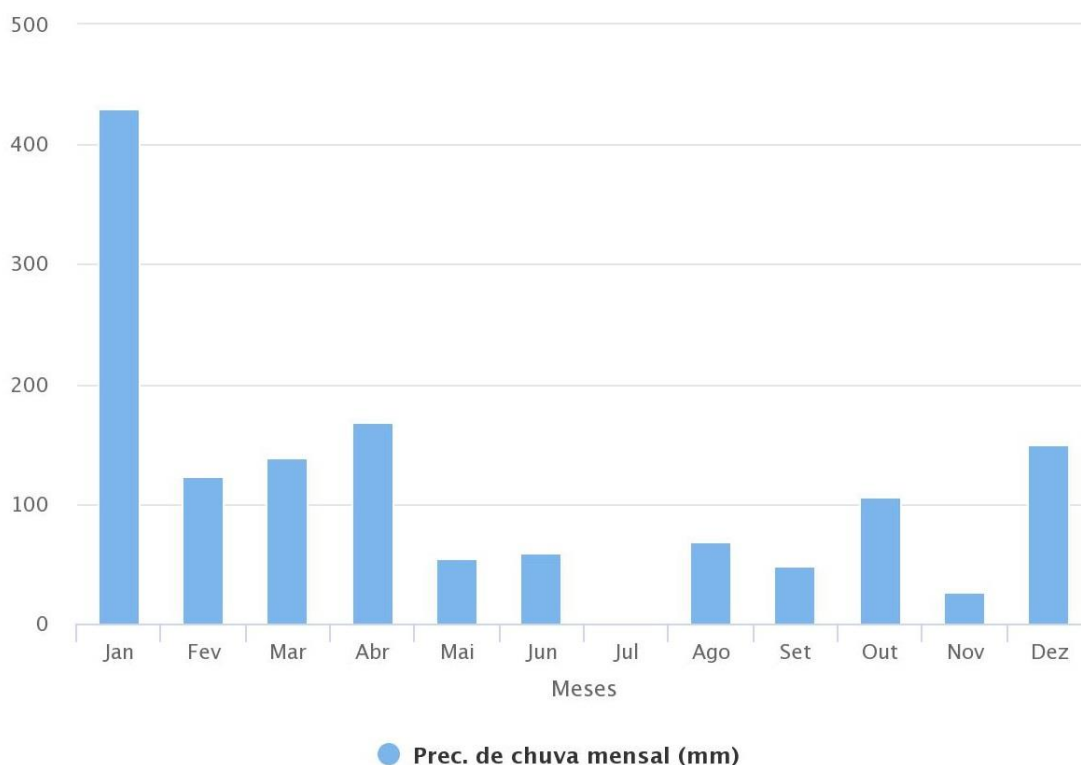
De acordo com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média mensal registrada na região é de 21°C (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Gráfico de temperatura média mensal.



Fonte: INMET, 2016.

Em relação a pluviosidade, a média de precipitação de chuva chega a 136 mm, com a concentração de chuvas nos meses do verão, sendo janeiro o mês que apresenta maior taxa de precipitação (430 mm), e o período mais seco sendo os meses de inverno, com o mês de julho sem chuvas (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Gráfico de precipitação.

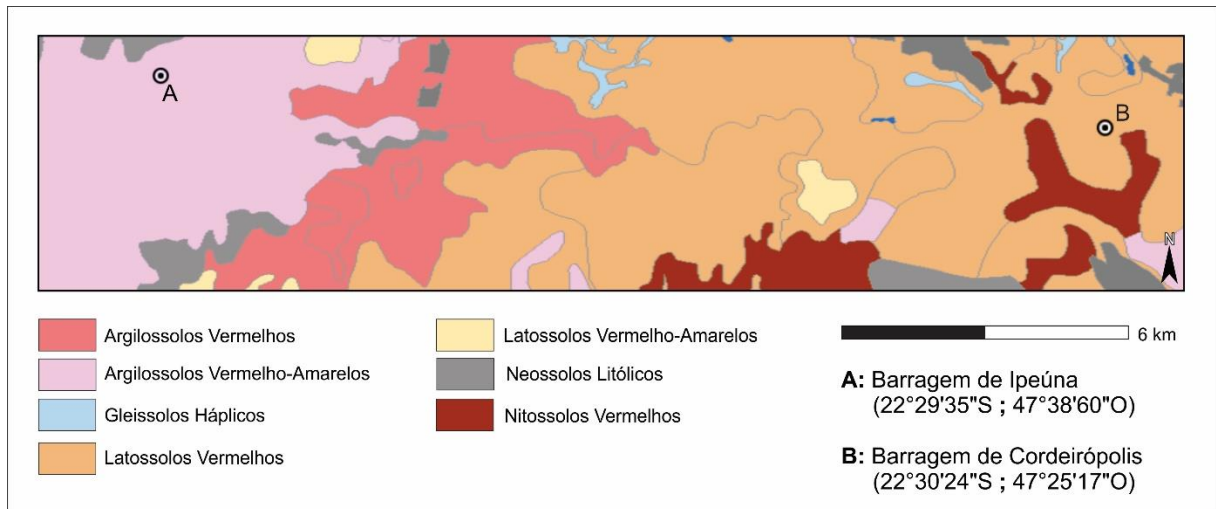
Fonte: INMET, 2016.

2.5 Contexto pedológico

A Figura 2.8 apresenta o mapa pedológico local com a localização das barragens de terra. A barragem de Cordeirópolis, representada pela letra B no mapa, está situada em solos classificados como Latossolos Vermelhos; já barragem de Ipeúna, representada pela letra A no mapa, está situada em solos classificados como Argilossolos Vermelho-Amarelos.

De acordo com Rossi (2017), os Latossolos Vermelhos da região de Cordeirópolis são distróficos, álicos, com textura argilosa, e relevo suave ondulado a ondulado. Os Argilossolos Vermelho-Amarelos da região de Ipeúna são distróficos, espessoarênico abrupto, com textura arenosa/média, álicos, e relevo ondulado.

Figura 2.8 – Mapa pedológico local com a localização das barragens.



Fonte: Modificado de ROSSI, 2017.

2.6 Uso e ocupação da terra

Em relação ao uso e ocupação da terra, as áreas no entorno da barragem de Cordeirópolis são utilizadas para o plantio de cana-de-açúcar (Figura 2.9). Além do plantio, há uma empresa de pisos e revestimentos cerâmicos nas proximidades da barragem, logo ao lado da Rodovia Washington Luís (SP-316).

A barragem de Ipeúna está localizada no interior do Pesqueiro Quilombo, portanto, sua área é utilizada para lazer e pesca recreativa (Figura 2.10). Além do pesqueiro, existem áreas próximas ao barramento que são utilizados para pastagem.

Figura 2.9 – Área ao entorno da barragem utilizada para plantio de cana-de-açúcar.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 2.10 – Pesqueiro Quilombo (direita) e seu reservatório utilizado para pesca recreativa.



Fonte: Arquivo pessoal.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Barragens são estruturas construídas transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, com a finalidade de criar um reservatório para acumulação de água, com tamanhos variados, desde pequenos maciços de terra à grandes estruturas de concreto. As barragens podem ser classificadas em diferentes categorias, de acordo com seu propósito, projeto hidráulico, material utilizado na sua construção. Com relação ao objetivo, as barragens são divididas em dois grupos: regularização e retenção.

3.1 Barragens de regularização

As barragens de regularização têm o objetivo de regularizar o regime hidrológico de um rio, armazenando água em períodos em que a afluência é maior que a demanda, para fornecer água em períodos de escassez e déficit de afluência em relação à demanda (COSTA, 2012).

As barragens de regularização apresentam diferentes funções, dependendo da sua finalidade. Pode ser utilizada para a elevação do nível natural, aumentando o volume de água armazenada, com objetivos de fornecer o abastecimento urbano, rural (irrigação) e industrial; o aproveitamento hidroelétrico para geração de energia elétrica; proporcionar ou melhorar as condições de navegação fluvial. As barragens também podem ter como finalidade a criação de um lago artificial, com objetivo turístico, ou para aprimorar as condições de piscicultura (COSTA, 2012).

Apesar de trazer muitos benefícios, a construção de barragens apresenta aspectos negativos, podendo causar danos ambientais, principalmente à fauna e à flora. Os problemas são mudanças no curso fluvial, alteração paisagística, alagamento de uma área, fazendo com que animais percam seu habitat natural, desaparecimento de espécies endêmicas e problemas no período de piracema (desova). A flora também sofre problemas com a inundação, acarretando na morte das espécies devido à submersão.

3.1.1 Barragens de contenção

As barragens de contenção têm como objetivo a retenção temporária de água, impedindo inundações à jusante ao amortecer a onda de enchente. Neste caso, a onda de cheia é contida temporariamente e a água é liberada de maneira que não cause prejuízos à jusante. Além do represamento temporário, as barragens de contenção também são utilizadas nas indústrias e minerações para acúmulo de resíduos industriais e rejeito de mineração (COSTA, 2012).

3.2 Tipos de barragens

As barragens podem ser de diferentes tipos, dependendo da sua finalidade, material de construção, aspectos fisiográficos e climáticos. As barragens convencionais são divididas em quatro tipos: terra, enrocamento, concreto ou mista.

3.2.1 Barragens de terra

As barragens de terra são estruturas que fazem parte história desde o início da civilização, principalmente para o armazenamento de água. Um dos registros mais antigos é uma barragem construída no Egito, há 6,8 mil anos, aproximadamente, com 12 metros de altura. Devido à falta de tecnologia no passado, o material do corpo da barragem era transportado manualmente e compactado através do pisoteamento, realizado por animais ou homens. Como exemplo é possível citar a barragem do Guarapiranga, construída no início do século XX, que foi compactada através do pisoteamento realizado por carneiros (MASSAD, 2003).

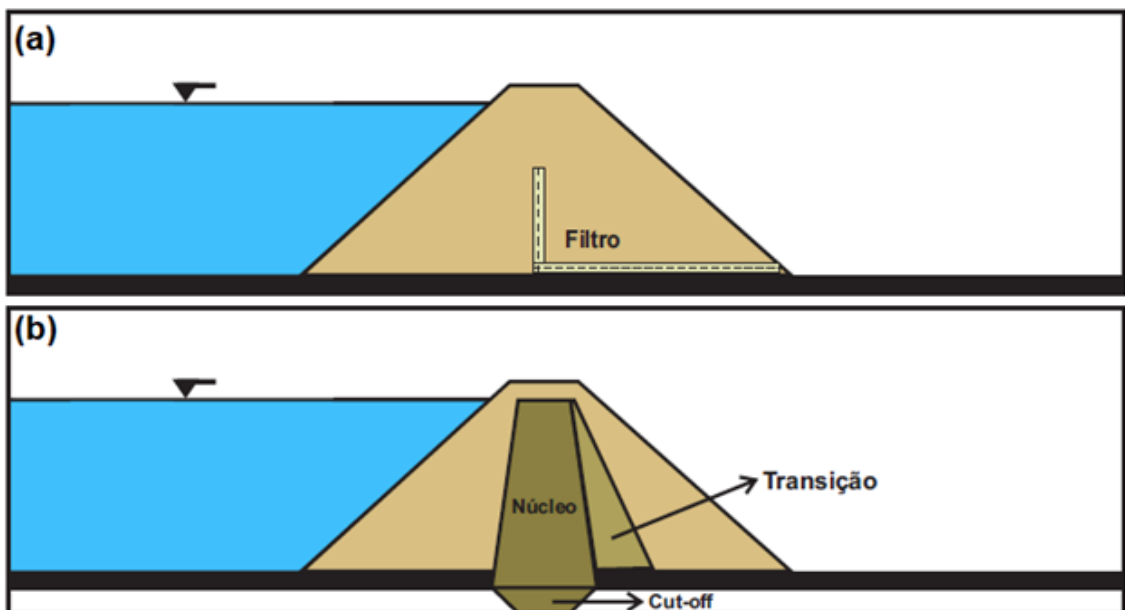
De acordo com Vargas (1977), no início do século XX, o Brasil construiu suas primeiras barragens de terra na região Nordeste e foram projetadas em bases empíricas, com planos de obras para combate à seca. A primeira barragem construída com uso de técnicas modernas de projeto e construção no Brasil ocorreu em 1974. Tal barragem está localizada no Estado do Rio de Janeiro e é denominada barragem Terzaghi, pois pela primeira vez houve o emprego de filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna.

Antigamente, as barragens de terra eram projetadas por métodos empíricos. Porém, existe grande quantidade de relatos na literatura sobre falhas durante ou

depois da obra ser realizada. A partir dessa estatística, houve a percepção que os métodos empíricos fossem substituídos por procedimentos de engenharia mais racionais, tanto para o projeto, quanto para a construção de barragens de terra. Apesar do atual sucesso na realização de obras de barragens, ainda há a ocorrência frequente de falhas associadas à pequenas barragens de terra. A causa do problema está relacionada à projetos inadequados e descuido na hora da construção. Para que a barragem seja bem estruturada é necessário que a fundação esteja preparada de maneira adequada e que o material do corpo da barragem esteja com o correto grau de compactação (MCDANIEL, 1987).

As barragens de terra podem ser divididas em dois tipos: homogêneas e zonadas (Figura 3.1). As barragens homogêneas são constituídas praticamente com um único material, com baixa permeabilidade, devido à compactação do solo, e pode apresentar elementos como filtros, *rip-rap* (quebra-ondas), tapetes impermeáveis, entre outros. As barragens zonadas são feitas com mais de um tipo de material. A barragem apresenta um núcleo central, constituído com um material menos permeável; o material mais permeável é utilizado na parte externa da seção transversal da barragem.

Figura 3.1 – (A) Barragem de terra homogênea; (B) Barragem de terra zonada.

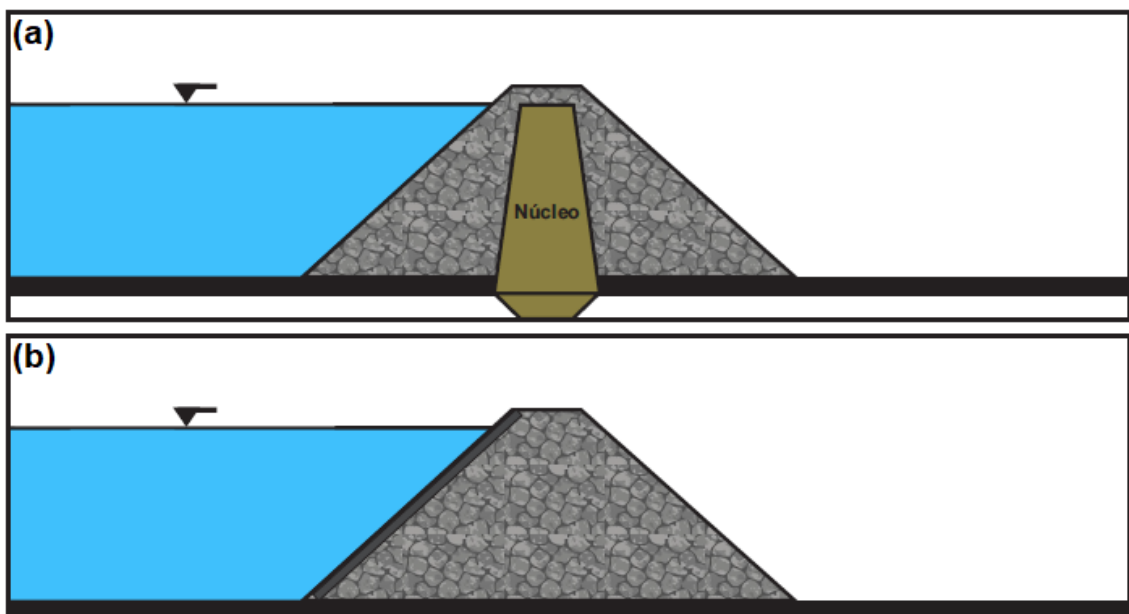


Fonte: Figura elaborada pelo autor.

3.2.2 Barragens de enrocamento

As barragens de enrocamento utilizam blocos de rocha de diferentes tamanhos, proporcionando a estabilidade da face de montante. As barragens de enrocamento podem apresentar núcleo impermeável ou face impermeável (Figura 3.2). O núcleo impermeável é composto de material argiloso, podendo ser centralizado ou inclinado para montante. É separado do enrocamento por zonas de transição, evitando a chegada de materiais finos. A face impermeável é responsável pela vedação da água. Localiza-se na face montante e pode ser de diferentes tipos de materiais, como asfalto, concreto ou metal (COSTA, 2012).

Figura 3.2 – (A) Barragem de enrocamento com núcleo impermeável; (B) Barragem de enrocamento com face impermeável.



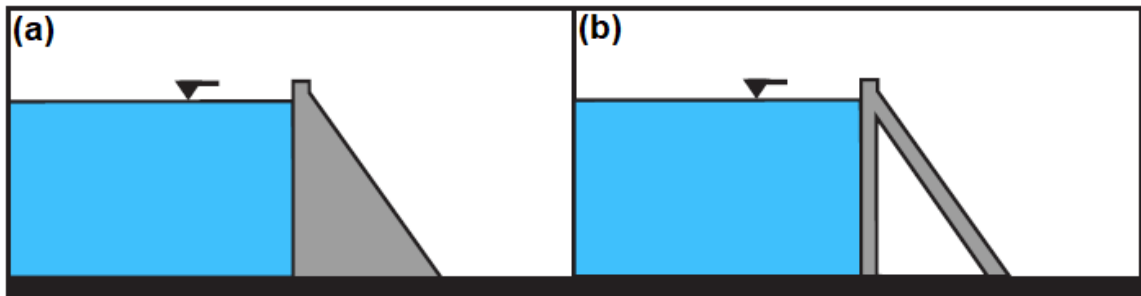
Fonte: Figura elaborada pelo autor.

3.2.3 Barragens de concreto

As barragens de concreto são divididas em três tipos: gravidade, gravidade aliviada e em arco. Barragens de gravidade (Figura 3.3 a) são estruturas maciças de concreto, com pouca armação, e apresentam traçado retilíneo ou em arco. O peso do concreto e a pressão da água a montante proporcionam estabilidade à estrutura da barragem. As barragens de gravidade aliviada (Figura 3.3 b) são estruturas de

concreto, mais leves e não maciças, com vazios internos, podendo ser curva ou retilínea. Devido aos esforços de tração, esse tipo de barragem exige maior uso de armações.

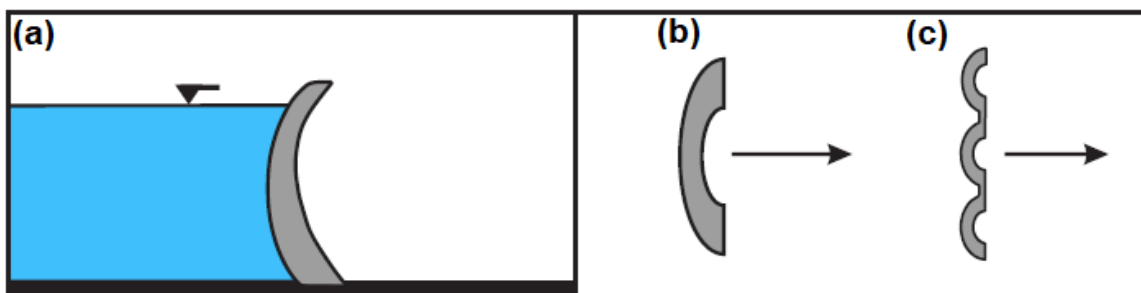
Figura 3.3 – (A) Barragem de concreto de gravidade; (B) Barragem de concreto de gravidade aliviada.



Fonte: Figura elaborada pelo autor.

As barragens em arco (Figura 3.4) apresentam curvatura na horizontal e vertical, podendo ser arcos simples ou múltiplos. São chamadas de barragens de dupla curvatura e consomem pouco volume de concreto na obra. Neste tipo de barragem, parte da pressão hidráulica é transmitida às ombreiras pelo efeito de arco (COSTA, 2012).

Figura 3.4 – (A) Barragem de concreto em arco; (B) Barragem arco simples; (C) Barragem arcos múltiplos.



Fonte: Figura elaborada pelo autor.

3.2.4 Barragens mistas

A barragem é classificada como mista quando é constituída por diferentes materiais ao longo da sua seção transversal, podendo ser de terra/enrocamento,

terra/concreto ou enrocamento/concreto. Barragens com vertedouro de concreto e corpo de terra ou enrocamento não são consideradas barragens mistas (COSTA, 2012).

3.3 Legislação de segurança de barragens

A segurança de barragens passou a ser uma preocupação internacional a partir de 1950, com o trabalho desenvolvido pelo *International Commission on Large Dams* – ICOLD. No ano de 1979 ocorreu o Congresso Internacional de Grandes Barragens em Nova Delhi, Índia, onde aumentou o foco para o assunto sobre segurança de barragens. A preocupação da Comissão Internacional de Grandes Barragens – CIGB, junto com a experiência de diversos países estimulou o desenvolvimento de planos para segurança de barragens.

No Brasil, o tópico segurança de barragens passou a ser abordado em seminários nacionais a partir de 1963, em São Paulo. No final de 1976, o atual Comitê Brasileiro de Barragens formou um Grupo de Segurança de Barragens para criação de uma minuta que servisse de orientação para investigação e avaliação da segurança em barragens (CESTARI JUNIOR, 2013).

A Lei nº 12.344 de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinadas às acumulações de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. De acordo com o Artigo 1º, a legislação aplica-se a barragens que apresente pelo menos uma das características a seguir: altura do maciço maior ou igual a quinze metros, capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos, reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis, e categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas. Os objetivos da PNSB são: garantir a observância de padrões de segurança de barragens, de modo a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências; regulamentar as ações de segurança a serem adotadas em todas as fases, desde o planejamento até a desativação e/ou usos futuros; promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança adotadas pelos responsáveis por barragens; a criação de condições para a ampliação do universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; coligir

informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; estabelecimento de conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos. Os responsáveis pela fiscalização das barragens no Brasil são: Agência Nacional das Águas – ANA, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA.

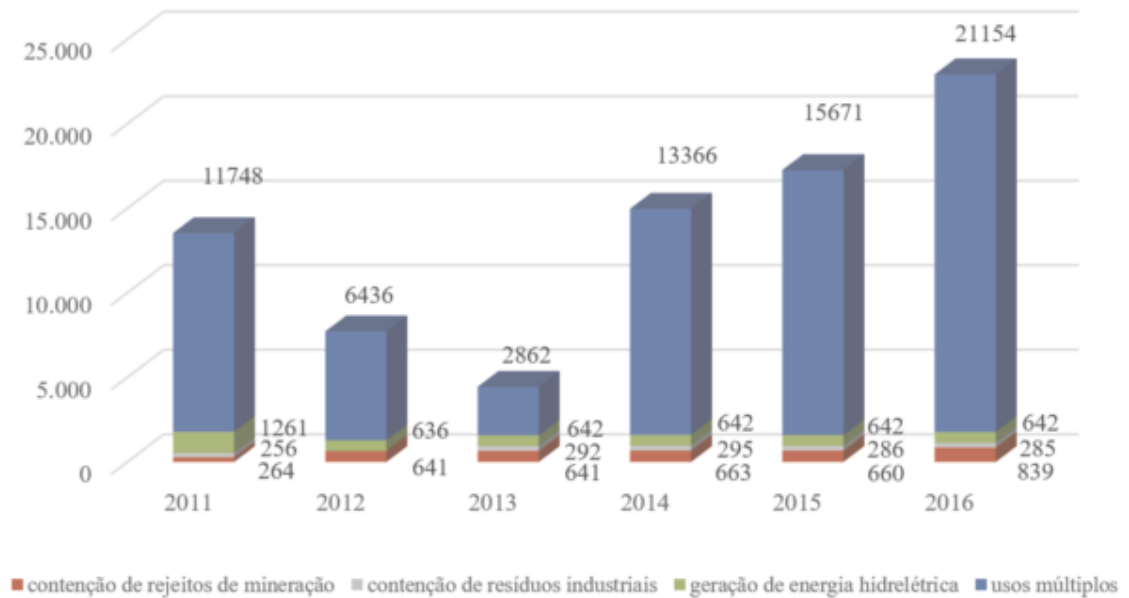
A Agência Nacional das Águas – ANA ficou responsável por organizar, implantar e administrar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNIB, promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores de barragens, fiscalizar a segurança de barragens outorgadas pela agência, elaborar e publicar anualmente o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) (CESTARI JUNIOR, 2013).

O objetivo do Relatório de Segurança de Barragens é apresentar à sociedade o panorama da evolução da segurança das barragens brasileira e a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens.

3.3.1 Dados estatísticos sobre barragens no Brasil

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens de 2016, publicado pela Agência Nacional de Águas – ANA, estão registradas 22.920 barragens no território brasileiro, sendo que 54,89% possuem outorga ou algum outro tipo de autorização, sendo, portanto, regularizadas. A grande maioria das barragens (21.154 – 92%) é para usos múltiplos. 4% para contenção de rejeitos de mineração, 3% para geração de energia elétrica e 1% para contenção de resíduos industriais. Ao comparar o número de barragens com os relatórios anteriores foi possível observar um aumento no número total de barragens, especialmente nas barragens de usos múltiplos e contenção de rejeitos de mineração (Figura 3.5). Apesar de 92% das barragens registradas serem de usos múltiplos, apenas 11.096, ou seja 54,45%, estão outorgadas e/ou licenciadas.

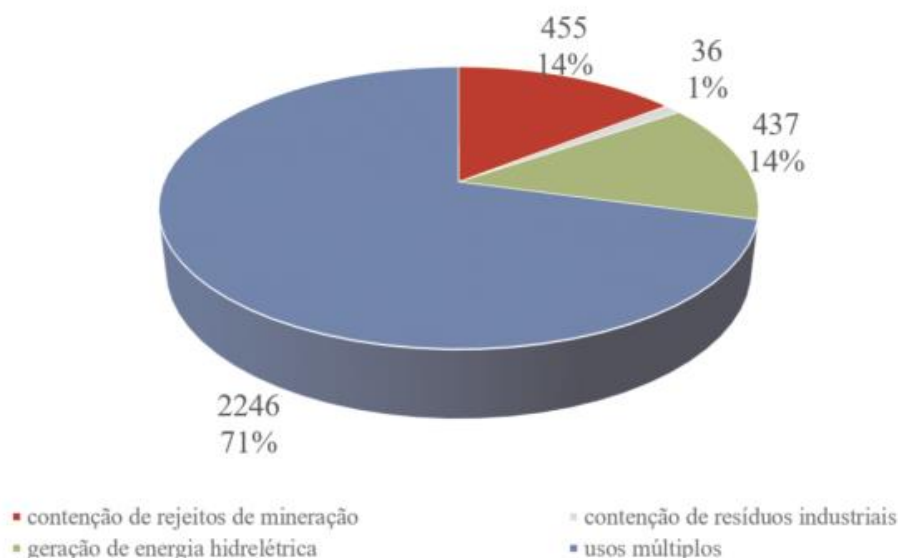
Figura 3.5 – Evolução do cadastro em relação ao uso principal.



Fonte: ANA, 2017.

O número de barragens enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens e que possuem empreendedor identificado, é de 3.174 (14% do total) (Figura 3.6). Somente nessas barragens é possível aplicar todos os instrumentos previstos na lei e regulamentos decorrentes, condicionantes que permitem a fiscalização completa da sua segurança (ANA, 2017). No relatório de 2016, 3.691 barragens foram classificadas por Categoria de Risco e 4.159 classificadas quanto ao Dano Potencial Associado, sendo que destas, 695 tiveram classificação simultânea com Categoria de Risco e Dano Potencial Associado altos. No entanto, 80% das barragens ainda precisam ser classificadas pois grande parte são barramentos de usos múltiplos.

Figura 3.6 – Barragens enquadradas na PNSB com empreendedor identificado, por uso principal.



Fonte: ANA, 2017.

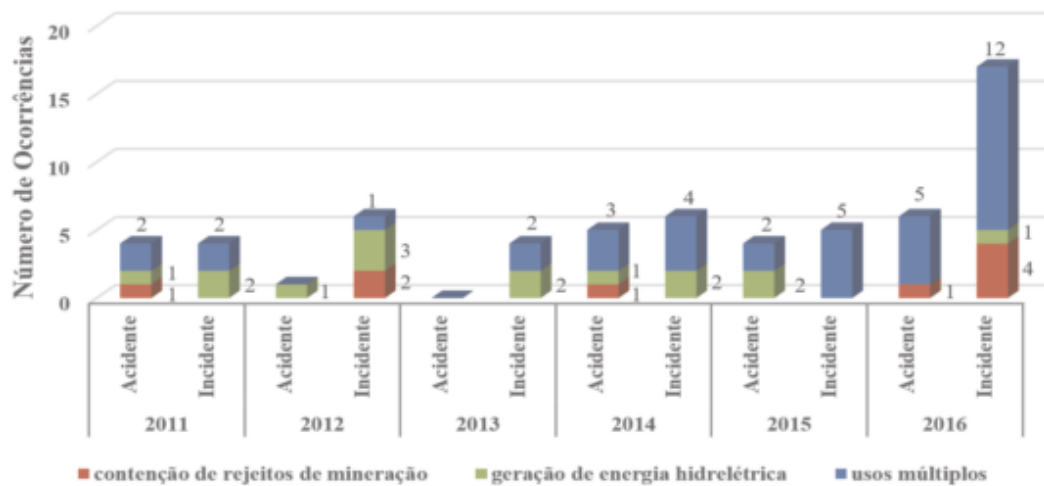
Durante o período de abrangência do último Relatório de Segurança de Barragens publicado (1/10/2015 – 31/12/2016) ocorreram seis acidentes e dezessete incidentes com barragens, número expressivo comparado aos anos anteriores (Figura 3.7). Dentre os acidentes, destaca-se o ocorrido na Barragem de Fundão, no município de Mariana, no Estado de Minas Gerais, que ocorreu em 05 de novembro de 2015. O acidente ocasionou a morte de 20 pessoas e causou diversos danos ambientais.

Em relação aos incidentes, a maior parte ocorreu em barragens de usos múltiplos (12 incidentes, de um total de 17). Foram reportados três incidentes próximos a barragem de Fundão, em Mariana: Barragem do Germano, Barragem de Santarém e Barragem da UHE Risoleta Neves (ANA, 2016).

O último acidente ocorreu no município de Brumadinho – MG, na região Metropolitana de Belo Horizonte e é considerado o maior acidente de barragem em relação ao significativo número de vítimas fatais. O rompimento da barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019 e ocasionou a morte de 166 pessoas, além de 144 que ainda estão desaparecidas (G1, 2019). O rompimento gerou um mar de lama que atingiu o setor administrativo e o refeitório da Vale, a comunidade local e o Rio Paraopeba. O acidente gerou diversos impactos ambientais, principalmente no Rio Paraopeba que, de acordo com estudos de análises

da qualidade da água, está contaminado por pelo menos 305 km (de um total de 546,5 km) (UOL, 2019).

Figura 3.7 – Acidentes e incidentes ocorridos anualmente após a implantação do Plano Nacional de Segurança de Barragens – PNSB.



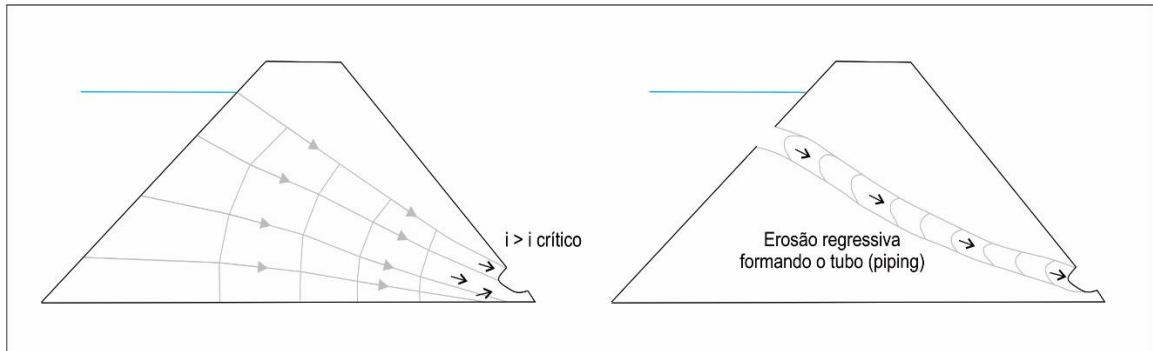
Fonte: ANA, 2017.

3.4 Problemas relacionados às barragens

Os problemas associados às barragens geralmente estão relacionados à ruptura e acidentes que ocorrem no corpo do barramento, podendo acontecer devido a um fator ou pela combinação de fatores. Lou (1981) divide as causas da ruptura em dois grupos: causas de origem humana e não humana. O primeiro grupo refere à erros em obras de engenharia, falhas na execução do projeto e localização imprópria. As causas não humanas referem-se a problemas como erosão interna (*piping*), galgamento (*overtopping*), escorregamentos, assentamentos e sismos.

Em barragens de terra, a formação do piping pode ocorrer de três maneiras: erosão regressiva, erosão devido à existência de trincas, e erosão por meio de carreamento de finos. A erosão regressiva (Figura 3.8) inicia-se no talude a jusante do barramento, formando um tubo no interior do maciço, criando então um fluxo d'água (PERINI, 2009).

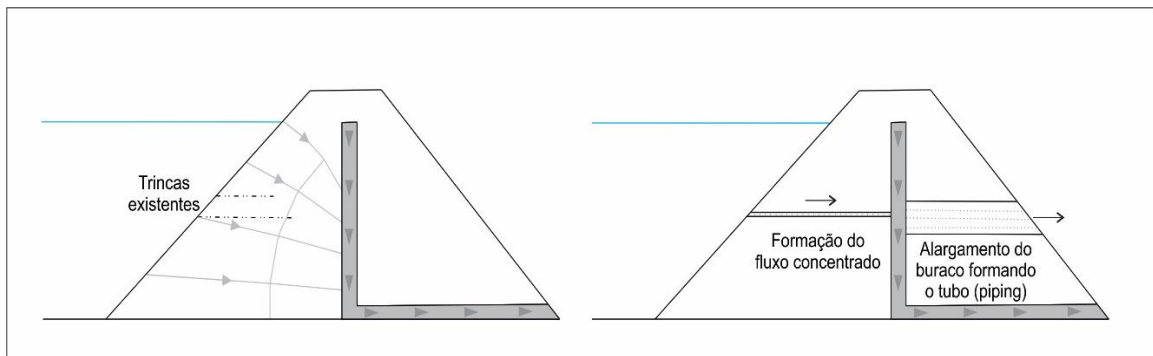
Figura 3.8 – Formação de *piping* por erosão regressiva.



Fonte: Modificado de Perini, 2009.

O segundo processo de formação de *piping* é a partir da existência de trincas no corpo da barragem (Figura 3.9). As rachaduras permitem a formação de um fluxo no interior do barramento; a percolação de água passa a erodir o solo, alargando as trincas e formando o tubo.

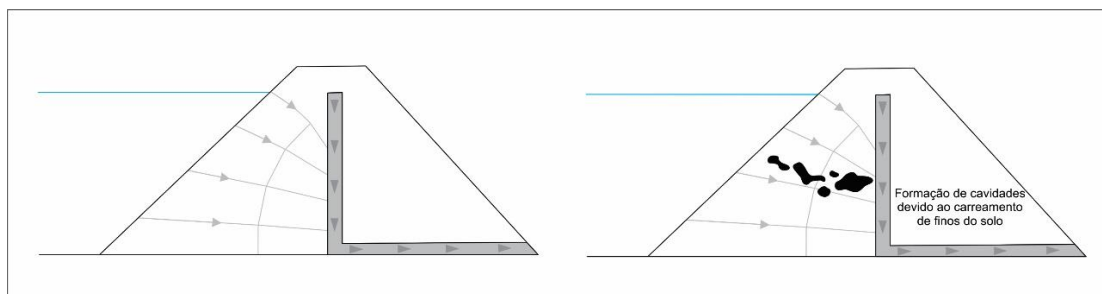
Figura 3.9 – Formação de *piping* a partir da existência de trincas.



Fonte: Modificado de Perini, 2009.

O terceiro processo de formação de *piping* é a partir do carreamento de finos (Figura 3.10). Esse processo ocorre quando os materiais utilizados no corpo da barragem são mal graduados, permitindo que os solos finos escapem por uma matriz granular. A passagem de água desestabiliza o interior do barramento, possibilitando a formação do *piping*.

Figura 3.10 – Formação de piping a partir do carreamento de finos.



Fonte: Modificado de Perini, 2009.

De acordo com Foster et al. (2000) as barragens de terra estão mais susceptíveis a ruptura, principalmente aquelas que não apresentam elementos de controle de percolação de água, como filtros e drenos. Além dos elementos de drenagem, Massad (2003) considera outros três fatores condicionantes à ocorrência de *piping* e formação de brechas em barragens de terra homogênea, como as condições de compactação do maciço terroso, a ausência de transições adequadas entre solos e materiais granulares e a presença de fundações arenosas.

Para evitar a ocorrência do *piping* é necessário cuidado na passagem do fluxo de um meio para outro e que não haja o carreamento de partículas de solo. Para isso, é necessário que as partículas do filtro sejam suficientemente pequenas para bloquear a passagem de partículas do solo. A permeabilidade recomendada para o filtro deve ser de 10 a 20 vezes a do solo a ser protegido, não podendo ser muito fino, a ponto de bloquear a passagem de água (MASSAD, 2003).

O Critério de Filtro de Terzaghi estabelece condições a serem satisfeitas pelo filtro e pelo solo a ser protegido, para garantir a proteção contra o *piping* (Equação 1) e para garantir a passagem de água (Equação 2).

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (1)$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{solo})} > 4 \text{ ou } 5 \quad (2)$$

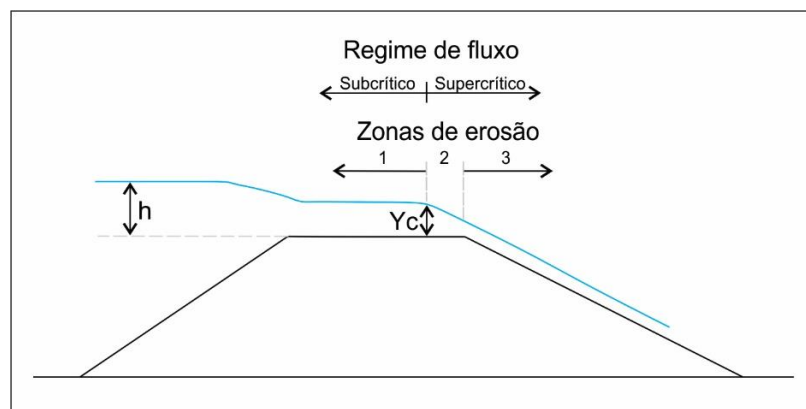
Onde:

- D_{15} = 15% passante na curva granulométrica do material grosseiro
- D_{85} = 85% passante na curva granulométrica do material mais fino

O galgamento (*overtopping*) ocorre quando há um aumento no fluxo de água, suficiente para que ocorra o transbordamento da barragem. Com o aumento do fluxo, ocorre o escoamento de água sobre a crista da barragem, até chegar ao talude a jusante, onde atinge velocidades críticas e o regime passa a ser supercrítico, causando danos ao barramento. Para Powledge et al. (1989) os fatores que influenciam a erosão por processo de galgamento são: a configuração, os materiais empregados, compactação, a velocidade de fluxo, presença de descontinuidades, o nível de água a jusante da barragem e a presença de materiais mais suscetíveis a erosão no talude a jusante.

O trabalho de Powledge et al. (1989) dividiu a região da crista da barragem em três zonas de erosão. A primeira (1) representa a região da barragem onde o regime de fluxo é subcrítico; a segunda zona (2) representa o final da crista, próximo a jusante do barramento, onde o regime de fluxo passa a ser supercrítico; a terceira (3) e última zona de erosão refere-se a zona fora da crista, no talude de jusante da barragem, onde o fluxo, assim como na segunda zona, é supercrítico (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Regime de fluxo hidráulico e as zonas de erosão.



Fonte: Modificado de Powledge et al., 1989.

No regime subcrítico as forças hidráulicas são baixas devido ao nível de energia ser baixo, portanto, as velocidades de fluxo são baixas. Apesar da altura da lâmina

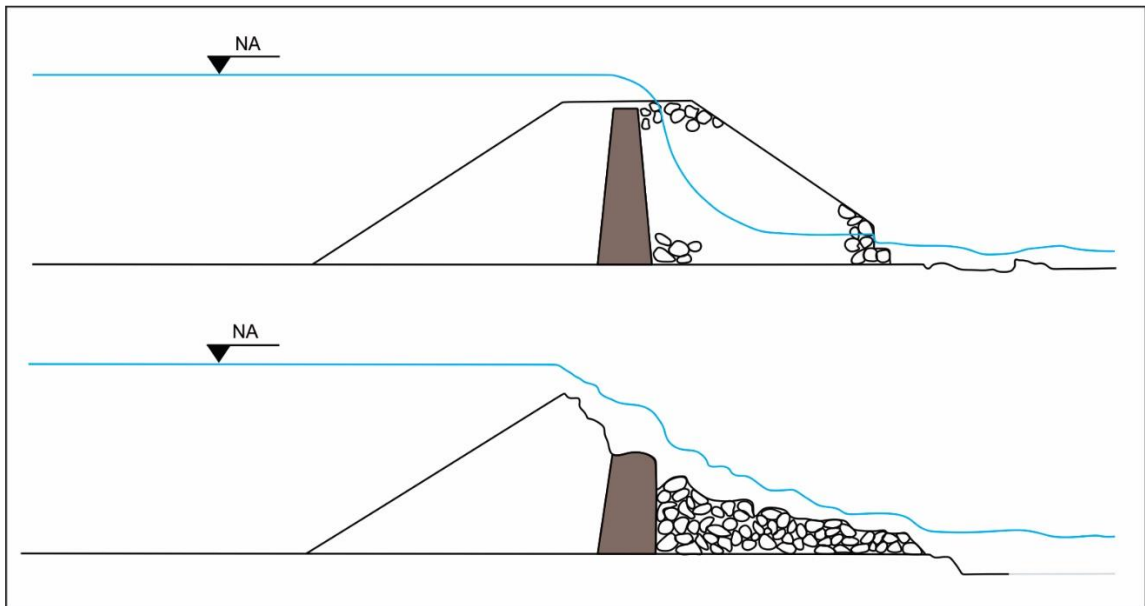
d'água ser maior, a baixa energia impõe um baixo stress de tração. Sendo assim, o processo erosivo só ocorrerá se o material desta zona for altamente erodível. Na primeira zona do regime supercrítico, onde ocorre a transição dos regimes de fluxo, há o aumento da energia e do stress de tração, iniciando o processo de erosão no final da crista, próximo ao talude a jusante. Para barramentos com pavimentação na crista, Powledge et al. (1989) explica que a superfície pavimentada pode vir a flutuar durante o processo de galgamento, devido a penetração de água em camadas subjacentes ao pavimento.

Na última zona do regime supercrítico, localizada no talude de jusante, os níveis de energia aumentam significativamente à medida que o fluxo segue talude abaixo. Devido à inclinação acentuada e a alta energia, o stress de tração é grande, resultando em um alto potencial de erosão. Logo após o início da erosão e aparecimento de descontinuidades, o fluxo passa a ser de cascata.

O início da erosão ocorre comumente em zonas de descontinuidade do talude, como no pé ou base da barragem; no entanto, dependendo das condições e da configuração do talude, a erosão pode iniciar em qualquer ponto da barragem.

O galgamento pode ocorrer em barragens compostas de materiais granulares e solos argilosos, com ou sem elementos de drenagem. Os mecanismos de erosão são diferentes para cada tipo, sendo que em barragens com material granulares a infiltração pode ser significativa. Uma vez que ocorra o galgamento, a infiltração existente no talude de jusante acelera o processo de erosão do talude. O processo inicia-se no pé ou próximo a base, onde existe a infiltração e a turbulência do fluxo é maior. Rapidamente, ocorrem deslizamentos da superfície e escoamento, que se propagam no talude. Quando o processo alcança a crista da barragem, ela é reduzida, permitindo maiores taxas de fluxo que irá acelerar o processo de erosão. O material granular da jusante, localizado acima do núcleo impermeável é removido e levado talude abaixo (Figura 3.12).

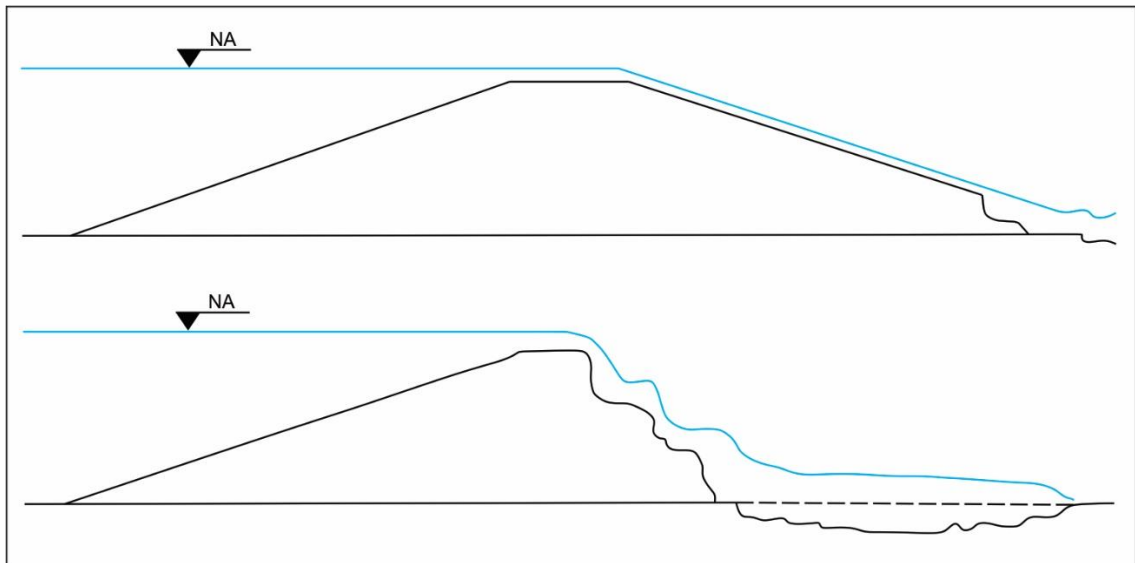
Figura 3.12 – Sequência erosiva gerada por galgamento (*overtopping*) em barragem de enrocamento com núcleo impermeável.



Fonte: Modificado de Powledge et al., 1989.

Barragens feitas com materiais coesivos são geralmente mais resistentes à erosão do que com materiais granulares devido a geometria e condição hidráulica. Isto ocorre graças à grande resistência a erosão e a ausência de infiltrações nos taludes por causa da baixa permeabilidade do material. Apesar de resistentes, o galgamento nessas barragens geralmente ocorre quando a erosão começa no pé da barragem durante uma erosão turbulenta e se propaga em sentido a montante, fazendo com que grandes pedaços de material sejam removidos pela tração do solo e por falhas de cisalhamento no talude (Figura 3.13).

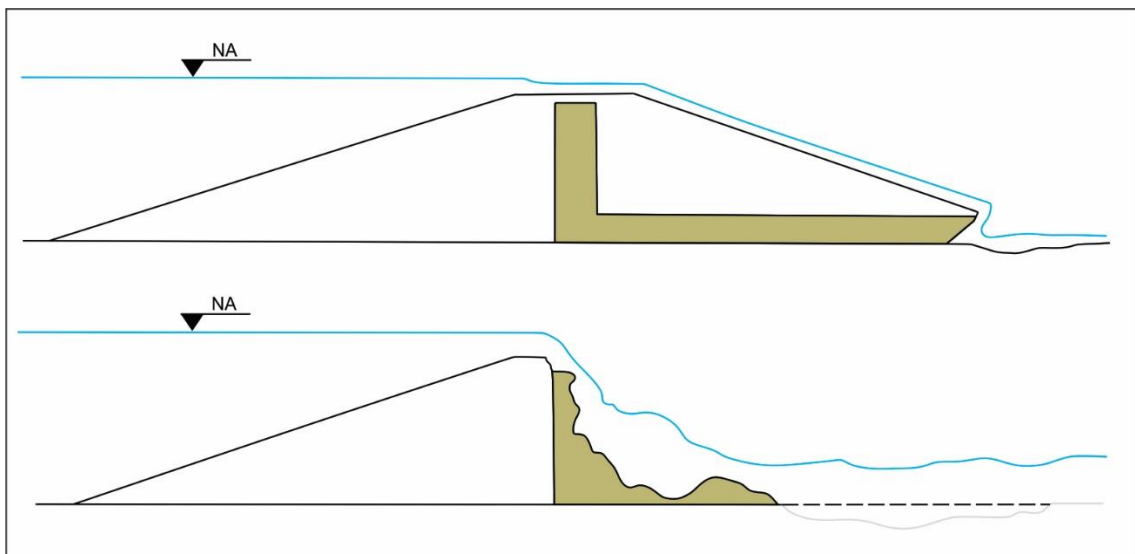
Figura 3.13 – Sequência erosiva gerada por galgamento (*overtopping*) em barragem homogênea com materiais coesivos.



Fonte: Modificado de Powledge et al., 1989.

As barragens feitas com materiais coesivos com elementos granulares, como filtros e drenos, também podem sofrer galgamento. Os componentes são facilmente erodidos uma vez que expostos ao fluxo de água, e irão acelerar o processo de erosão da barragem (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Sequência erosiva gerada por galgamento (*overtopping*) em barragem homogênea com materiais coesivos com elementos granulares.



Fonte: Modificado de Powledge et al., 1989.

Para prevenir e reduzir o acontecimento do processo de galgamento (*overtopping*), engenheiros pesquisaram e identificaram diversos sistemas de proteção para as barragens. Os métodos mais adequados para prevenir o acontecimento do processo são aqueles que incorporam modificações a superfície da barragem (POWLEDGE et al., 1989), sendo eles:

- **Vegetação:** plantação de grama na superfície do aterro.
- **Geotêxtil:** manta ou tapete permeável capaz de drenar, filtrar, reforçar e proteger, quando associado ao solo.
- **Cimento:** utilizado para formar solo-cimento ou concreto compactado a rolo (CCR) para aplicar na superfície do aterro.
- **Blocos de concreto:** blocos de concreto pré-moldados projetados para fazer um bloqueio mecânico ou que são amarrados juntos por cabos que passam pelo interior dos blocos.
- **Rip-rap (quebra-ondas):** enrocamento de diâmetro médio colocada na parte mais superior da superfície do aterro, à montante, a uma determinada espessura.
- **Gabião:** rochas de tamanho uniforme inseridas em uma malha de fios de aço galvanizados colocadas na superfície do aterro.

4 METODOLOGIA EMPREGADA

4.1 Geofísica aplicada no estudo de barragens

Os métodos geofísicos são ótimas ferramentas no estudo de barragens, pelo fato de serem não destrutivos, o que é de extrema importância quando se está trabalhando em uma barragem, pois métodos destrutivos podem causar danos ou agravar os eventuais problemas no corpo de um barramento. Nos últimos anos houve um aumento na demanda do uso de técnicas geofísicas não destrutivas para estudar o interior de barragens, visto que facilita uma primeira identificação ou diagnóstico de fenômenos anômalos nas barragens (Voronkov et al. 2004).

Os principais métodos geofísicos que estão sendo escolhidos para investigação de zonas de infiltração são os métodos da Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo (SP), o que pode ser visto nos casos a serem citados a seguir.

No estudo de Panthulu et al. (2001) foram realizados ensaios geofísicos geoeletricos de Potencial Espontâneo (SP) e Eletrorresistividade em duas das quatro barragens de Saddle, do projeto Som-Kamla-Amba, no estado de Rajastão, na Índia, para identificação de zonas de infiltração. Os resultados da Eletrorresistividade foram satisfatórios, pois foi possível determinando as zonas de fraqueza, que são responsáveis pela infiltração; já os resultados do método do Potencial Espontâneo (SP) foram úteis para confirmar as infiltrações nas zonas de fraqueza, delimitadas pelo estudo da Eletrorresistividade. Além disso, os dois métodos foram satisfatórios para a determinação do fluxo de infiltração.

O estudo de Sjö Dahl et al. (2005) foi realizado para investigar a segurança da barragem de rejeitos de Enemossen, no sul da Suécia, e utilizou três métodos geofísicos: Polarização Induzida (IP), Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo (SP). Os resultados do estudo foram satisfatórios, com um destaque para os resultados de resistividade, que apresentaram os melhores dados, pois o alto contraste na resistividade entre o solo e a baixa resistividade da água disposta nos rejeitos da barragem possibilitou a identificação de áreas com alta concentração de água e as possíveis zonas de vazamento na barragem foram representadas pelas áreas de baixa resistividade.

O estudo de Lin et al. (2013) foi feito na barragem de terra de Hsin-Shan, no Taiwan. Após a barragem ter sido reconstruída para aumentar o nível máximo do

reservatório, houve o aparecimento de vazamentos na face montante da barragem, e por esse motivo foram realizados ensaios geofísicos de eletrorresistividade com o uso da técnica da tomografia elétrica para investigar o mecanismo dos vazamentos. Foram feitas três linhas geofísicas (A, B e C) de comprimentos diferentes (282 m, 212,5 m e 235 m), com a linha A abrangendo toda a extensão da crista; além da geofísica, dados de monitoramento geotécnicos foram adicionados ao estudo. Após o processamento e análise dos dados foram definidas duas zonas de baixa resistividade na linha A que é correlacionada com as zonas de baixa resistividade da linha B, sendo que os dois caminhos prováveis de infiltração estão correlacionados com pontos de vazamentos determinados na barragem.

O estudo de Michalis et al. (2016) utilizou dois métodos geofísicos diferentes para o estudo da barragem de Mugdock, localizada na região central da Escócia, no Reino Unido. O método principal foi o da Eletrorresistividade, utilizado para determinar a integridade estrutural da barragem; o outro método escolhido foi o Eletromagnético (EM), que foi utilizado para complementar o estudo, em relação a confirmação dos valores de resistividade obtidos para as camadas superiores de solo da crista da barragem. Os resultados do estudo apresentaram dados de alta resistividade nas camadas de solo mais superiores, que são relacionadas com uma matriz de solo mais seco composta por uma mistura de argila, areia e cascalho. Em relação à infiltração, dados de baixa resistividade foram associados com zonas de alta saturação de argila, que provavelmente estão relacionadas às infiltrações ocorrendo no corpo da barragem de terra.

O estudo de Camarero (2016) foi feito em duas barragens de terra no interior do estado de São Paulo e utilizou o método da Eletrorresistividade com o arranjo Wenner para determinar eventuais zonas de infiltração. Além do método geofísico, também foi utilizado ensaios geotécnicos para complementar a pesquisa. Para cada barragem foram adquiridas três linhas geofísicas paralelas ao eixo longitudinal da barragem, com espaçamento de 2 metros. Os resultados gerados apresentaram zonas de baixos valores de resistividade elétrica, que interpretados como zonas saturadas e prováveis zonas de infiltração no corpo da barragem. Uma das áreas de estudo do trabalho Camarero (2016) é a barragem de Cordeirópolis, que foi a mesma escolhida para ser estudada no presente trabalho.

Na barragem de Santa Helena, em Camaçari, na Bahia, o estudo de Schibelscky et al (2018) utilizou três métodos geoeletricos para investigar percolações anômalas

no corpo da barragem: Eletrorresistividade, Potencial Espontâneo e Polarização Induzida. Durante o levantamento geofísico foram dispostas 7 linhas paralelas a crista da barragem e outras duas linhas transversais sobre as ombreiras. O arranjo escolhido para os ensaios de Eletrorresistividade e Polarização Induzida foi o Dipolo-dipolo e o processamento dos dados foi feito no software Res2dinv. Os resultados dos ensaios detectaram regiões de alta saturação e fluxos de percolação anômala de água na região adjacente ao vertedouro, voltado para ombreira direita da barragem. O uso de diferentes métodos geofísicos mostrou ter muita importância no momento de interpretação dos dados, pois possibilita a eliminação de ambiguidades, além de enriquecer a interpretação geofísica.

4.2 Métodos geofísicos

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

Os estudos geofísicos são empregados em diversas áreas tais como: pesquisa mineral, petróleo, hidrogeologia, geotecnia, geologia ambiental, entre outros. A grande vantagem da geofísica é que ela pode ser utilizada para estudos em subsuperfície com a realização de medidas feitas em superfície. Além disso é um método indireto, que permite a aquisição de dados de maneira rápida, eficaz e com ótimo custo-benefício. No presente trabalho foram aplicados os métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida em duas barragens de terra com finalidade de determinar eventuais zonas de infiltração.

4.2.1 Propriedades elétricas dos materiais

Uma das propriedades físicas mais variáveis é a resistividade. A grande maioria dos minerais que formam as rochas são isolantes, portanto, a corrente elétrica é conduzida através das rochas, principalmente pela passagem de íons nas águas dos poros. A eletricidade é conduzida, na maioria das rochas, mais por processos eletrolíticos que por processos eletrônicos. (KEAREY et al., 2002).

A resistividade dos materiais geológicos apresenta um grande intervalo de variação, desde $1,6 \times 10^{-8} \Omega.m$ (prata nativa) até $10^{16} \Omega.m$ (enxofre puro). As rochas

ígneas tendem a apresentar as mais altas resistividades; já as rochas sedimentares são mais condutivas, devido aos seus poros. As rochas metamórficas apresentam resistividades intermediárias (REYNOLDS, 1997).

Apesar da porosidade ser o principal controle de resistividade das rochas, as rochas cristalinas com porosidade intergranular insignificantes são condutoras ao longo de fraturas e fissuras.

Os valores de resistividade em solos superficiais variam de acordo com a variação do teor de umidade e grau de compactação de camadas mais superficiais do solo.

Os valores de resistividade variam para cada material e tipo litológico (Tabela 4.1), porém, é preciso lembrar que variações no grau de intemperismo e alteração da rocha, condições de metamorfismo, presença de fraturas, porosidade, entre outros, podem alterar os valores padrões.

Tabela 4.1 – Faixa de valores de resistividade elétrica para diferentes materiais e tipos litológicos.

Tipo litológico		Resistividade ($\Omega.m$)
Zona não saturada		100 a 30.000
Zona saturada (corpo do barramento)	Argiloso	≤ 20
	Argilo-arenoso	20 a 40
	Areno-argiloso	40 a 60
	Siltito argiloso	10 a 60
	Siltito arenoso	
	Arenoso	≥ 60
	Argilito	10 a 20
	Arenito	80 a 200
Basalto		10 a $1,3 \times 10^7$
Diabásio		20 a 5×10^7
Calcário		50 a 1×10^7
Gnaisse		3.000 a 5.000
Granito		5.000 a 1×10^6
Quartzo		$> 1 \times 10^6$

Fonte: Reynolds, 1997.

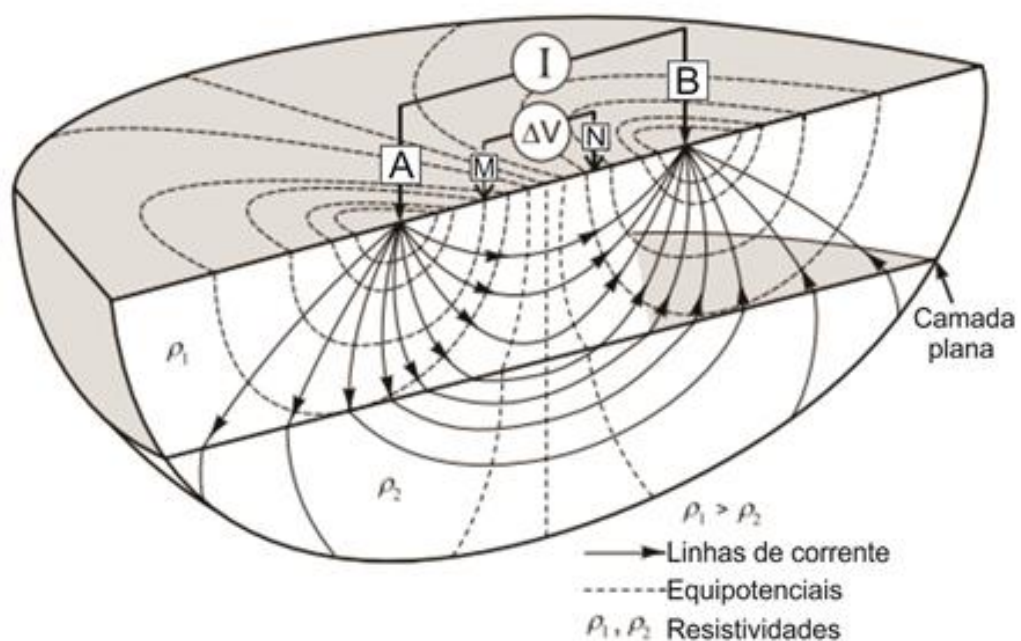
4.2.2 Método da Eletrorresistividade

O método da Eletrorresistividade consiste na introdução de correntes elétricas no solo, geradas artificialmente através do resistivímetro, que resulta em uma diferença de potencial (ddp) medida em superfície. Os desvios de padrão de tensão esperados de um solo homogêneo fornecem informações na forma e nas propriedades elétricas de inhomogeneidades de subsuperfície (KEAREY et al., 2002).

O método é utilizado no estudo de discontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e na detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala. A aplicação pode ser feita em diversos estudos como detecção de falhas e fraturas em rochas cristalinas, mapeamento de plumas de contaminação, detecção de cavidades subterrânea, investigação de estruturas litológicas subterrâneas, entre outros (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

A medida de propagação do campo elétrico é feita com o uso de um par de eletrodos de corrente (A e B) e um par de eletrodos de potencial (M e N). A corrente é introduzida no solo através do primeiro par de eletrodos e a diferença de potencial é medida através do segundo par (Figura 4.1)

Figura 4.1 – Propagação do campo elétrico em meio isotrópico e tridimensional, por meio da associação de quatro eletrodos.



Fonte: KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007.

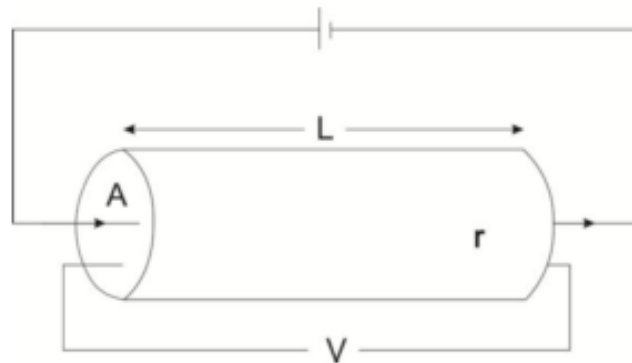
A Lei de Ohm estabelece a relação entre a resistência elétrica de um material (R), a corrente elétrica que flui pelo material (I) e a diferença de potencial (ddp) (ΔV) (HALLIDAY et al., 1993), onde:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Na Lei de Ohm, a corrente é diretamente proporcional à diferença de potencial (ddp) aplicada ao dispositivo e inversamente proporcional à resistência do material. A unidade utilizada para diferença de potencial é expressa por *volt*, para corrente é *ampere* e para resistência é *ohm*.

A resistência depende de parâmetros como resistividade (ρ), comprimento do corpo (L) e área da seção transversal (A) (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Parâmetros utilizados na definição de resistividade.



Fonte: KEAREY et al., 2002.

A resistividade elétrica (ρ) significa a dificuldade de passagem de corrente elétrica por um material. Para um cilindro condutor, a resistividade é dada por:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (4)$$

Para meios homogêneos e isotrópicos, o valor de resistividade obtido corresponde ao verdadeiro valor de resistividade do meio, entretanto, os materiais geológicos são, em sua maioria, heterogêneos e anisotrópicos e desta maneira apresentam resistividades contrastantes em meios estratificados, podendo causar perturbações nas superfícies equipotenciais. Portanto, a resistência obtida no meio geológico é

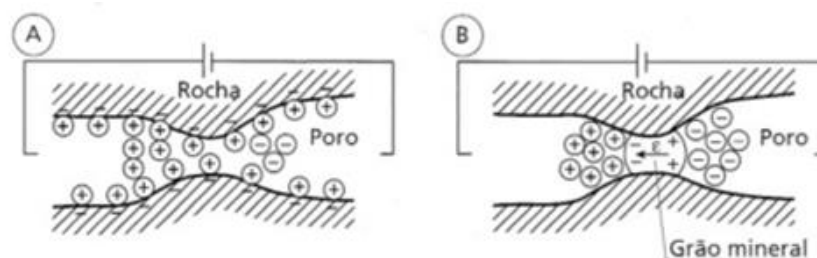
denominada resistividade aparente (ρ_a), que representa uma média ponderada das resistividades de cada um dos materiais presentes entre as equipotenciais (ROBINSON, 1988). A resistividade aparente (ρ_a) é representada por meio da seguinte equação:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

4.2.3 Método da Polarização Induzida

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente elétrica observado como uma resposta retardada à voltagem estabelecida, em materiais naturais (SUMNER, 1976). Ao utilizar um arranjo padrão de resistividade de quatro eletrodos, quando a corrente for abruptamente desligada, a voltagem entre os eletrodos de potencial (M e N) não cai a zero imediatamente. A sequência de fluxo negativo e positivo pode ser intercalada com períodos em que a corrente está desligada. Depois de um decréscimo abrupto inicial, a voltagem sofre um decaimento gradual e pode levar vários segundos para atingir o valor zero. Por outro lado, quando a corrente é ligada, o potencial aumenta gradualmente durante um intervalo de tempo até atingir um valor estável. O lento decaimento e aumento de parte do sinal ocorrem devido à Polarização Induzida, que resulta de dois efeitos similares relacionados à estrutura das rochas: a polarização da membrana e a polarização eletrônica (Figura 4.3) (KEAREY et al., 2002; LOWRIE, 2007).

Figura 4.3 – Mecanismos de Polarização Induzida: (A) polarização de membrana; (B) polarização eletrônica.



Fonte: KEAREY et al., 2002.

A polarização de membrana resulta da interação entre os íons dissolvidos na água, presentes nos poros das rochas, com as superfícies de minerais eletricamente carregados, como os argilominerais (MUSSET; KHAN, 2009). A polarização de membrana é maior na presença de argilominerais, pois estes apresentam poros pequenos. Porém, a magnitude não tem um crescimento constante com a concentração de argila, e sim atinge um valor máximo e volta a decrescer.

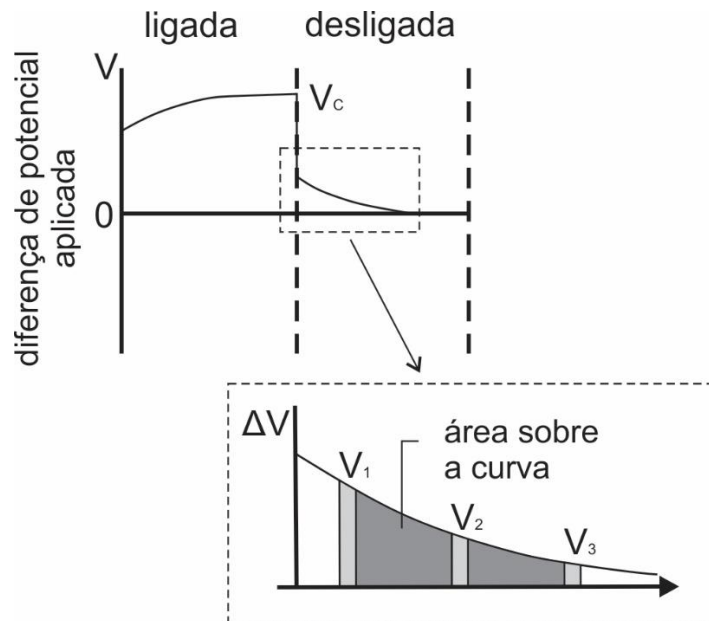
A polarização eletrônica é um fenômeno que surge pela presença de metais ou minerais metálicos em que o processo de condução da corrente ocorre através de elétrons (LOWRIE, 2007).

As medições de polarização induzida no domínio do tempo envolvem o monitoramento do decaimento da voltagem após o desligamento da corrente. A intensidade do fenômeno de polarização é definida pelo parâmetro da cargabilidade (M), que pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$M_{t_1 t_2} = \frac{1}{V_o(t_2-t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (6)$$

A cargabilidade é expressa em mV/V, pois a tensão de polarização é da ordem de mil vezes menor que a tensão medida para a corrente contínua. Para realizar o procedimento de medida, a corrente é enviada por alguns segundos e depois é desligada pelo mesmo intervalo de tempo. A dissipação das cargas acumuladas produz um potencial residual (V_r), que é lido num intervalo de tempo determinado (t_1 , t_2), frequentemente limitado a alguns segundos. As medidas são repetidas diversas vezes para cada ponto, para que seja possível encontrar um valor médio confiável. A área da curva de decaimento entre os dois pontos de medidas consecutivos é calculada e dividida pela diferença de potencial registrada pouco antes da corrente ser desligada, em medidas no domínio de tempo (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Procedimento de medição do método IP no domínio do tempo.



Fonte: MUSSET; KHAN, 2000.

4.2.4 Técnicas e arranjos

4.2.4.1 Tomografia elétrica

A aquisição de dados de resistividade e cargabilidade pode ser realizada a partir de dois procedimentos: sondagem elétrica vertical (SEV) e tomografia elétrica. No presente trabalho foi utilizado o segundo procedimento.

A técnica de tomografia elétrica investiga variações laterais (horizontais) e é empregada para investigação de diversos fatores, como presença de veios, falhas e zonas de cisalhamento. Em estudos geotécnicos, subsidia a determinação de variações na profundidade do embasamento e presença de descontinuidades abruptas. No emprego desta técnica, os eletrodos de corrente e os eletrodos de potencial (M e N) são mantidos a uma separação fixa, e são movidos progressivamente ao longo do perfil (KEAREY et al., 2002). Quanto maior o espaçamento entre os eletrodos, maior a profundidade de investigação.

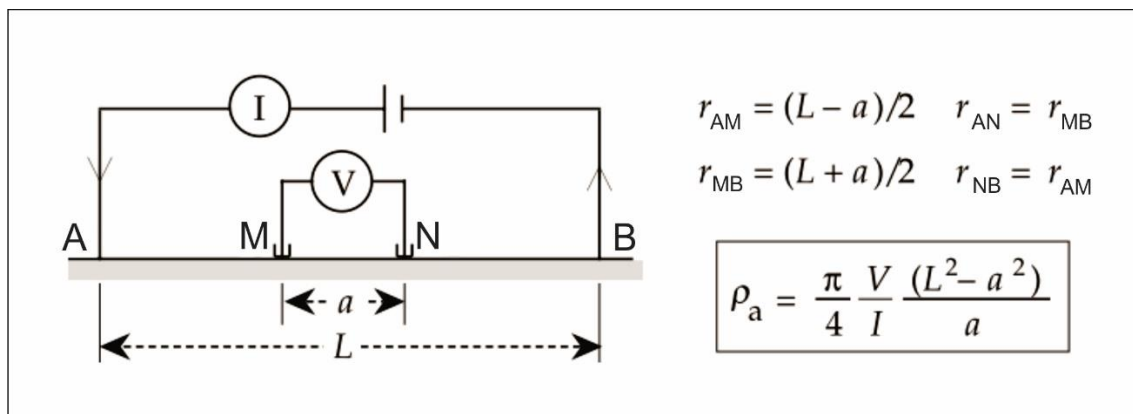
Cada arranjo de eletrodos apresenta uma geometria, sequência e espaçamento. Os principais arranjos são: Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo, Pólo-dipolo, Pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente. No presente trabalho foram utilizados os arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.

A escolha de qual arranjo utilizar depende de diversos fatores, como o tipo de alvo a ser mapeado (sensitividade de cada arranjo para variações verticais e horizontais), a razão sinal/ruído e a profundidade de investigação (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

4.2.4.2 Arranjo Schlumberger

O arranjo Schlumberger é configurado por dois pares de eletrodos dispostos de maneira retilínea na superfície do terreno. É um arranjo simétrico em relação a um ponto central. Os eletrodos de corrente (A e B) são dispostos externamente aos eletrodos de potencial (M e N), e a espaçamento MN deve ser igual ou menor que um quinto da abertura AB ($AB/MN \geq 5$) (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Arranjo Schlumberger e cálculo da resistividade aparente.



Fonte: Modificado de Lowrie, 2007.

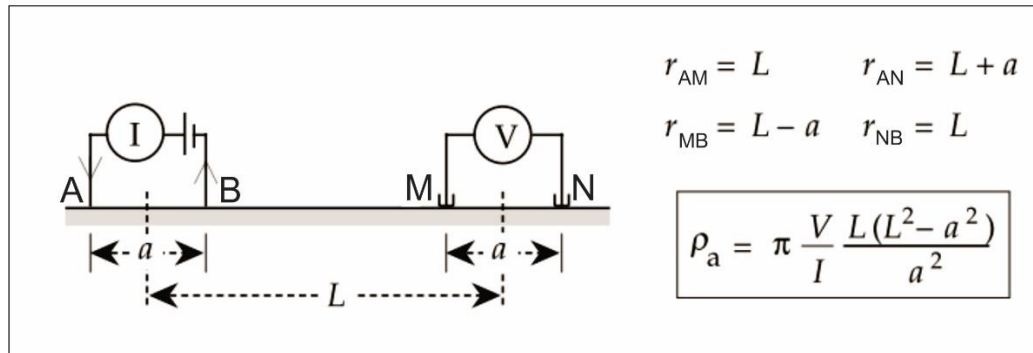
O arranjo Schlumberger apresenta superioridade em relação à qualidade, visto que as leituras estão menos susceptíveis às interferências geradas por ruídos e a erros interpretativos em terrenos não homogêneos (LOKE, 2000).

4.2.4.3 Arranjo Dipolo-dipolo

No arranjo Dipolo-dipolo o espaçamento entre os eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (A e B) é mantido fixo durante todo o levantamento, apenas aumentando a separação entre eles através do fator “n·a”. Cada afastamento dos pares de eletrodo representa um nível de profundidade investigado, sendo que quanto

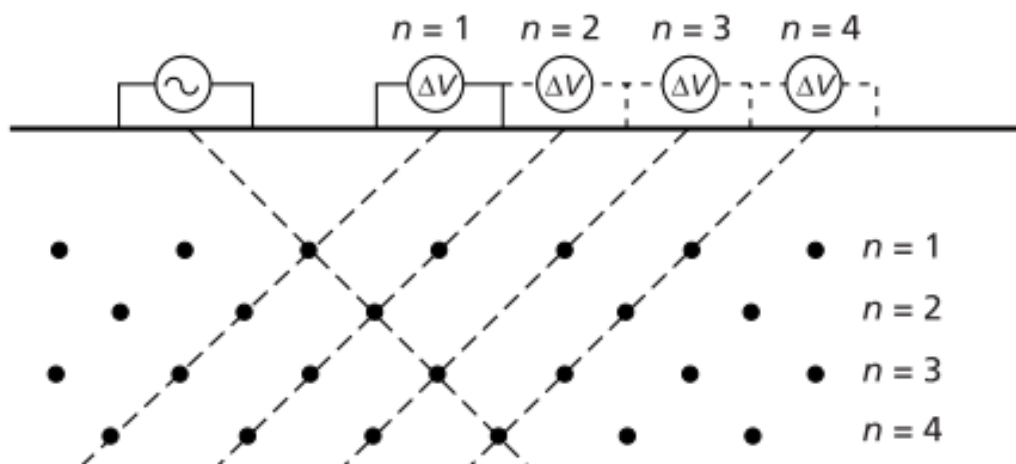
maior a distância entre os pares, mais profundo será o nível de investigação (Figuras 4.6 e 4.7) (MUSSET; KHAN, 2009).

Figura 4.6 – Arranjo Dipolo-dipolo e cálculo da resistividade aparente.



Fonte: Modificado de Lowrie, 2007.

Figura 4.7 – Esquema de aquisição com o arranjo Dipolo-dipolo.



Fonte: Kearey et al., 2002.

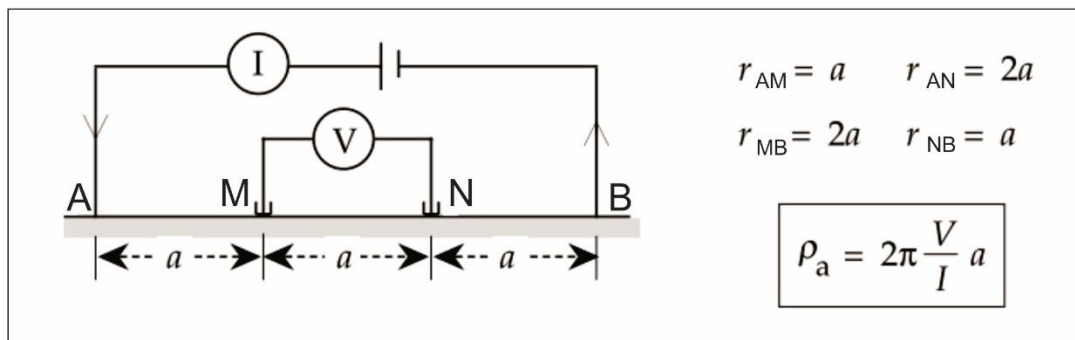
É o arranjo mais empregado em estudos geoeletricos, sendo utilizado para diversas investigações, como mineração, prospecção de água subterrânea, estudos ambientais e geologia de engenharia. Apresenta boa resolução horizontal e facilidade operacional em campo. A desvantagem do arranjo Dipolo-dipolo é a baixa razão sinal-ruído, principalmente quando há grande a distância entre os dipolos.

4.2.4.4 Arranjo Wenner

O arranjo Wenner apresenta a configuração mais simples entre os arranjos, pois seus eletrodos de corrente (A e B) e eletrodos de potencial (M e N) são mantidos com o mesmo espaçamento a (Figura 4.8). Apesar de manter o mesmo espaçamento constante, todos os eletrodos precisam ser movidos entre sucessivas leituras (KEAREY et al., 2002).

O arranjo Wenner apresenta vantagens no estudo de estruturas horizontais, devido a sensibilidade a variações verticais de resistividade em subsuperfície. Outra vantagem do arranjo é a elevada razão sinal/ruído. A principal desvantagem do arranjo é a perda rápida de cobertura com a profundidade.

Figura 4.8 – Arranjo Wenner e cálculo da resistividade aparente.



Fonte: Modificado de Lowrie, 2007.

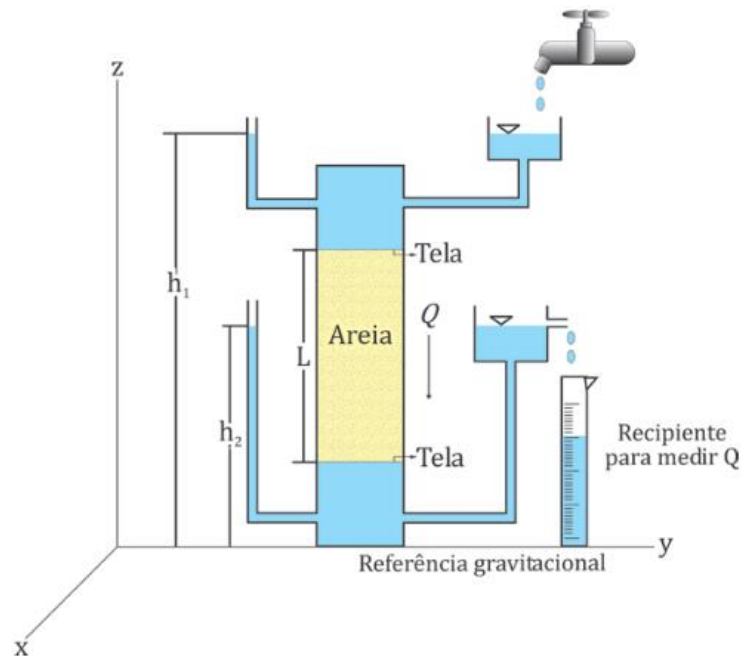
4.3 Permeabilidade do solo

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através de seus vazios, portanto, um material é considerado permeável se apresentar vazios contínuos. Os vazios existem em todos os tipos de solo e em praticamente todos materiais de construção não-metálicos. Além disso, o fluxo de água através dos materiais obedece praticamente às mesmas leis (TERZAGHI et al., 1967).

Em 1856, o francês Henry Darcy realizou experimentos com fluxo de água através de filtros preenchidos com areia homogeneizada e saturada (Figura 4.9) (LIBARDI, 2005). A partir desse estudo, Darcy chegou as seguintes conclusões sobre a vazão:

- A vazão (Q) é proporcional à área de secção transversal (A) do filtro;
- A vazão (Q) é proporcional à diferença de carga hidráulica ($h_1 - h_2$);
- A vazão (Q) é inversamente proporcional ao comprimento (L) do filtro.

Figura 4.9 – Esquema do experimento de Henry Darcy.



Fonte: Jesus, 2012.

Com a combinação dos três itens concluídos acima e adicionando uma constante de proporcionalidade (k) foi criada a equação da Lei de Darcy:

$$Q = kA \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (7)$$

O gradiente hidráulico (i) é determinado pela diferença das cargas hidráulicas dividido pelo comprimento (L) do filtro, como mostra a equação 8:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{\Delta h}{L} = \frac{dh}{dl} \quad (8)$$

Ao substituir o gradiente hidráulico (i) na equação 7, obtemos:

$$Q = kiA \quad (9)$$

A divisão de Q por A gera a equação 10 a seguir:

$$v = ki \quad (10)$$

Onde v equivale a velocidade de descarga de fluido na secção transversal (A).

Darcy determinou que a constante de proporcionalidade (k) é a condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade, que é uma propriedade física que mede a facilidade com que a água flui através de materiais permeáveis. É inversamente proporcional à viscosidade da água, que diminui com o aumento da temperatura (TERZAGHI et al., 1967). Os valores do coeficiente de permeabilidade são baixos e por isso são comumente expressos por uma potência negativa de 10. Os valores são expressos em centímetros por segundo (cm/s) (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Valores do coeficiente de permeabilidade (k).



Fonte: Modificado de Massad, 2003.

4.3.1 Fatores que influenciam a permeabilidade

Os principais fatores que afetam a permeabilidade do solo são: composição mineralógica, forma e textura das partículas, distribuição do tamanho das partículas, temperatura, natureza do fluido, índice de vazios, grau de saturação, tipo de fluxo, estrutura do solo (TERZAGHI, 1967).

As diferentes composições mineralógicas do solo absorvem diferentes quantidades de água e apresentam diferenças na porosidade, portanto, é um fator que influencia a permeabilidade, principalmente de solos de granulação fina, compostos por argilas.

Em relação a forma, as partículas mais alongadas e/ou irregulares são capazes de criar passagens de fluxos diferentes do fluxo em volta de partículas esféricas. Solos com presença de argila e silte apresentam uma menor variação no tamanho das partículas em relação a solos com a presença de areias e materiais mais grossos. Isso ocorre devido a menor variação do tamanho das partículas dos materiais mais finos.

A textura das partículas influencia na resistência que esta apresenta em relação ao fluxo. Partículas com superfícies rugosas proporcionam mais resistência do que partículas com a superfície lisa.

O tamanho das partículas afeta os valores de permeabilidade do solo. Pequenas partículas oferecem um menor espaço para os vazios entre elas, portanto, há um aumento na resistência de fluxo de água em relação ao decréscimo do tamanho das partículas.

A Tabela 4.2 apresenta dados de porcentagem e permeabilidade e é possível observar que com um pequeno aumento na porcentagem de finos, houve uma notável diminuição na permeabilidade (JESUS, 2012).

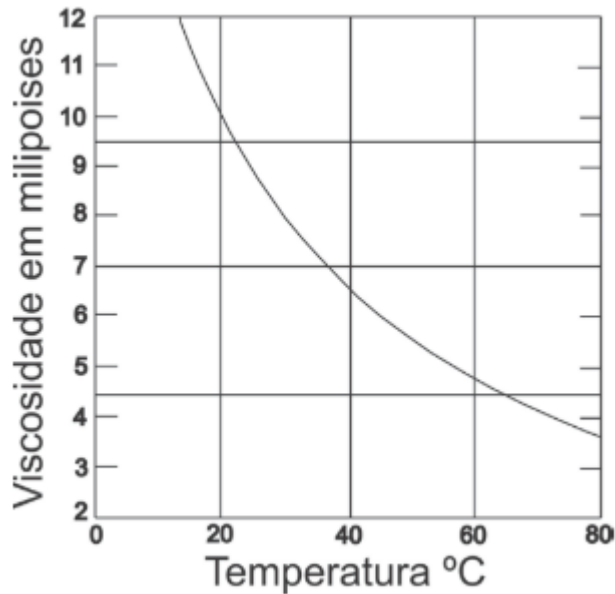
Tabela 4.2 – Influência da fração que passa na peneira 100 na permeabilidade de filtros de agregado lavado

Porcentagem que passa na peneira 100	Permeabilidade (cm/s)
0	$2,82 \times 10^{-4}$ a $1,06 \times 10^{-3}$
2	$3,53 \times 10^{-5}$ a $3,53 \times 10^{-4}$
4	$7,06 \times 10^{-6}$ a $1,76 \times 10^{-4}$
6	$1,76 \times 10^{-6}$ a $7,06 \times 10^{-5}$
7	$7,06 \times 10^{-7}$ a $1,06 \times 10^{-5}$

Fonte: Modificado de Cedergren, 1988.

Os fatores temperatura e viscosidade estão relacionados e seus valores podem influenciar na permeabilidade. Baixas temperaturas implicam em alta viscosidade, portanto, quanto menor a temperatura, maior a fluidez do fluido e maior será a facilidade do seu escoamento (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Viscosidade da água em função da temperatura.



Fonte: Cedergren, 1988.

O índice de vazios (e) é a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume das partículas sólidas (V_s). Os valores de índices de vazios, junto com a porosidade, podem influenciar os valores de permeabilidade de maneira direta.

O índice de vazios pode ser expressado pela seguinte equação:

$$e = \varepsilon = \frac{V_v}{V_s} \quad (11)$$

O grau de saturação (S_r) é a porcentagem volumétrica da água que existe nos vazios do solo. É um fator importante na determinação da permeabilidade, pois os canais de infiltração entre as partículas podem ser bloqueados por bolhas de ar, o que resulta em uma redução na permeabilidade (JESUS, 2012).

Segundo Head (1981), durante os ensaios de permeabilidade é recomendado que a quantidade de ar presente no solo seja eliminada.

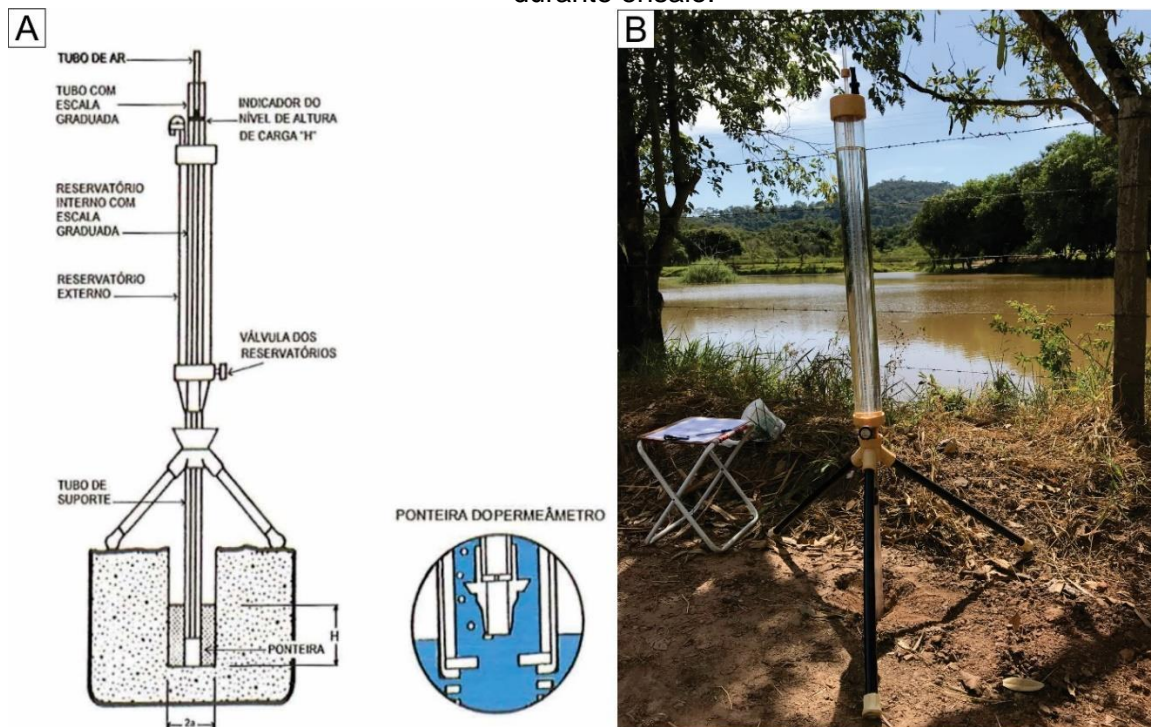
A estrutura do solo é fundamental para a permeabilidade. Estruturas como descontinuidades, matéria orgânica, lentes, intrusões, grãos irregulares, entre outros. Solos coesivos podem ter valores de permeabilidade maiores do que a permeabilidade medida em pequenas amostras em laboratório, devido a presença das estruturas listadas acima. A interferência também ocorre em solos mais finos, em

razão do estado de floculação ou dispersão das partículas, orientação e estado de compactação (HEAD, 1981).

4.3.1.1 Permeâmetro de Guelph

Em 1983, Reynolds e Elrick desenvolveram o permeâmetro de Guelph (Figura 4.12). Dois anos depois, em 1985, os mesmos aperfeiçoaram o equipamento, na *University of Guelph*, localizada no Canadá.

Figura 4.12 – (A) Esquema do permeâmetro de Guelph; (B) Permeâmetro de Guelph durante ensaio.



Fonte: (A) Alfaro Soto, 1999; (B) Arquivo pessoal.

O permeâmetro, antes de montagem, pode ser dividido em quatro partes: tripé, tubo de apoio e válvula de ajustes do tubo de ar, reservatório de água, e cabeça de medição graduada com válvula de ajustes no tubo de ar superior.

Após a montagem, o equipamento é operado facilmente. Pode ser utilizado em estudos hidrológicos e de solo, sistemas de irrigação, drenagem e reservatórios sépticos, aterros sanitários, canais, entre outros.

5 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados geofísicos e geotécnicos foram adquiridos em duas etapas de trabalho de campo nos municípios de Ipeúna e Cordeirópolis. Antes de iniciar a coleta de dados foi realizado um trabalho de campo de reconhecimento da área das barragens, que permitiu uma análise das condições fisiográficas e para determinação do número de linhas de levantamento geofísico.

Todos os equipamentos e materiais utilizados em campo foram disponibilizados pelo Laboratório de Geofísica Aplicada e pelo Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente, do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus Rio Claro.

5.1 Dados geofísicos

Os dados geofísicos foram adquiridos a partir dos métodos da Eletroresistividade e Polarização Induzida, com uso da técnica de tomografia elétrica e os arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo.

A aquisição de dados geofísicos ocorreu em dois dias de trabalho de campo. Foi feita uma aquisição conjunta de dados de resistividade e cargabilidade. No primeiro dia de campo (12/09/2017) foram levantadas 2 linhas de tomografia elétrica de 128 metros de comprimento cada, num total 256 metros de dados geofísicos na barragem de Ipeúna (Figura 5.1). O espaçamento utilizado entre os eletrodos foi de 2 metros. As linhas foram dispostas no eixo da barragem.

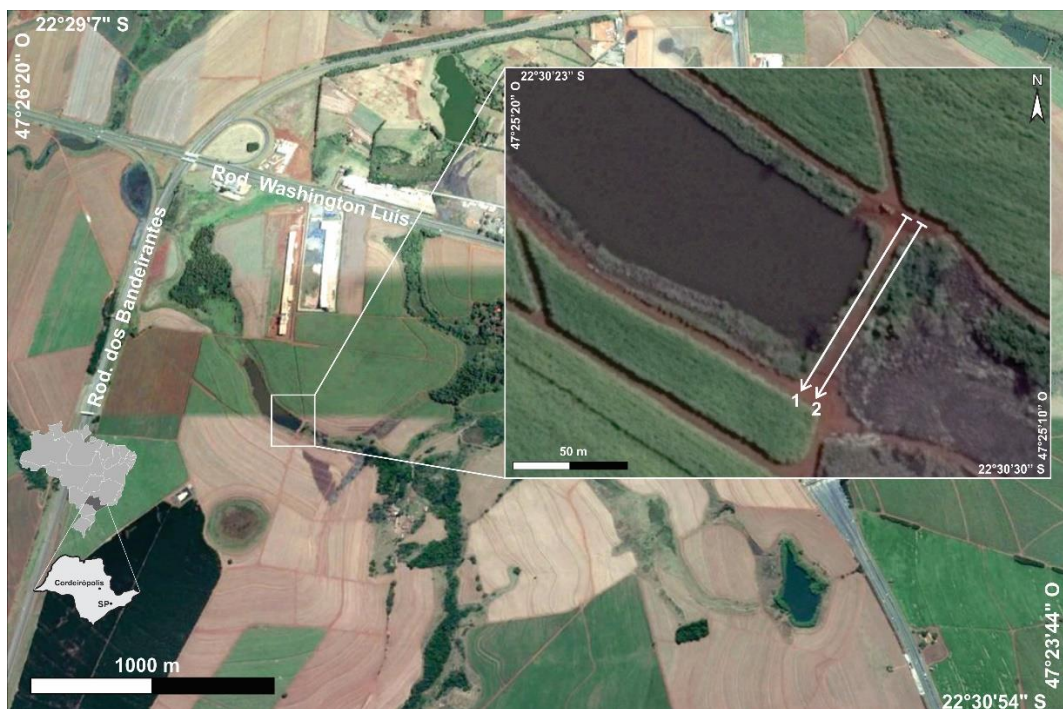
No segundo dia de campo (14/09/2017) foram levantadas 2 linhas de tomografia elétrica de 92 metros de comprimento cada, totalizando 184 metros de dados geofísicos na barragem de Cordeirópolis (Figura 5.2). O espaçamento utilizado entre os eletrodos foi de 2 metros. Assim como na barragem de Ipeúna, as linhas foram dispostas no eixo da barragem. A linha 1 está localizada próxima à montante e a linha 2, próxima à jusante (Figura 5.3).

Figura 5.1 – Localização das linhas de aquisição de dados geofísicos na barragem de Ipeúna – SP.



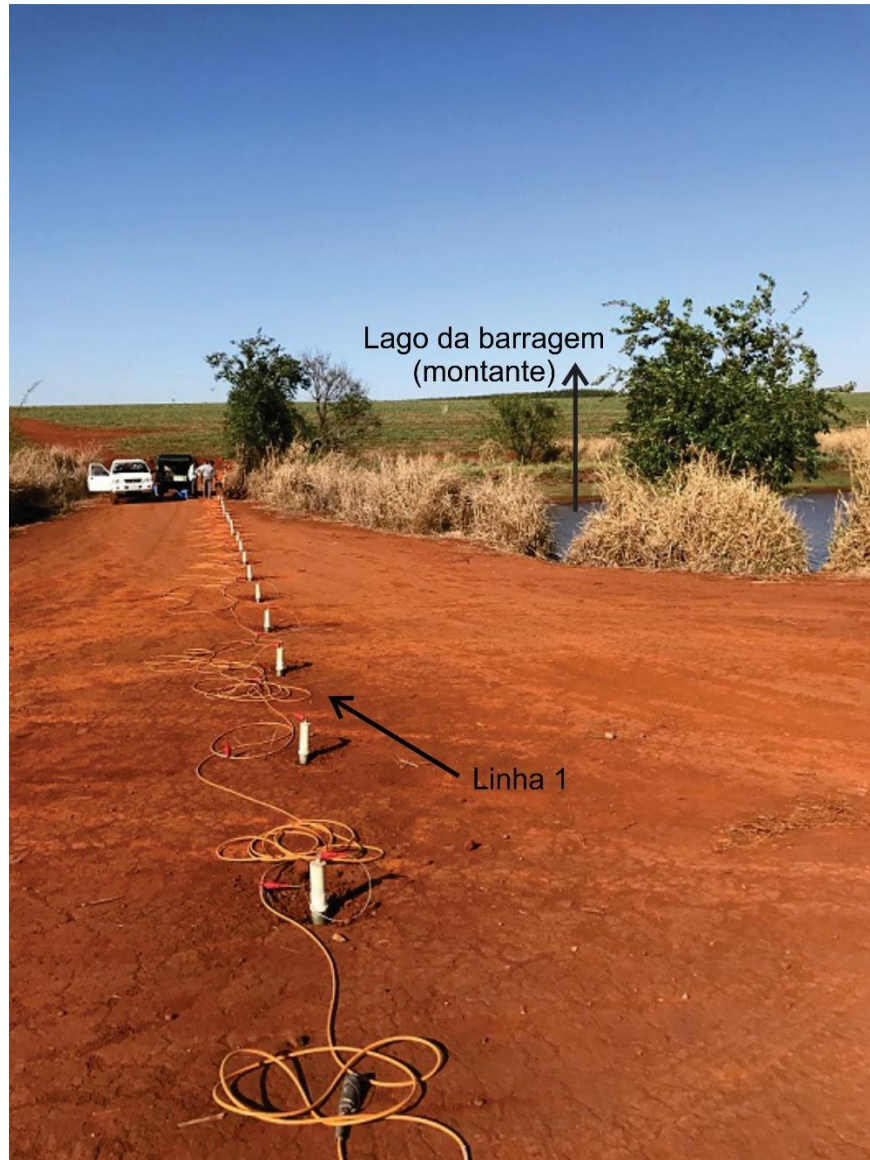
Fonte: Modificado de Google Earth, 2018.

Figura 5.2 – Localização das linhas de aquisição de dados geofísicos na barragem de Cordeirópolis – SP.



Fonte: Modificado de Google Earth, 2018.

Figura 5.3 – Localização da linha 1, próxima à montante da barragem de Cordeirópolis.

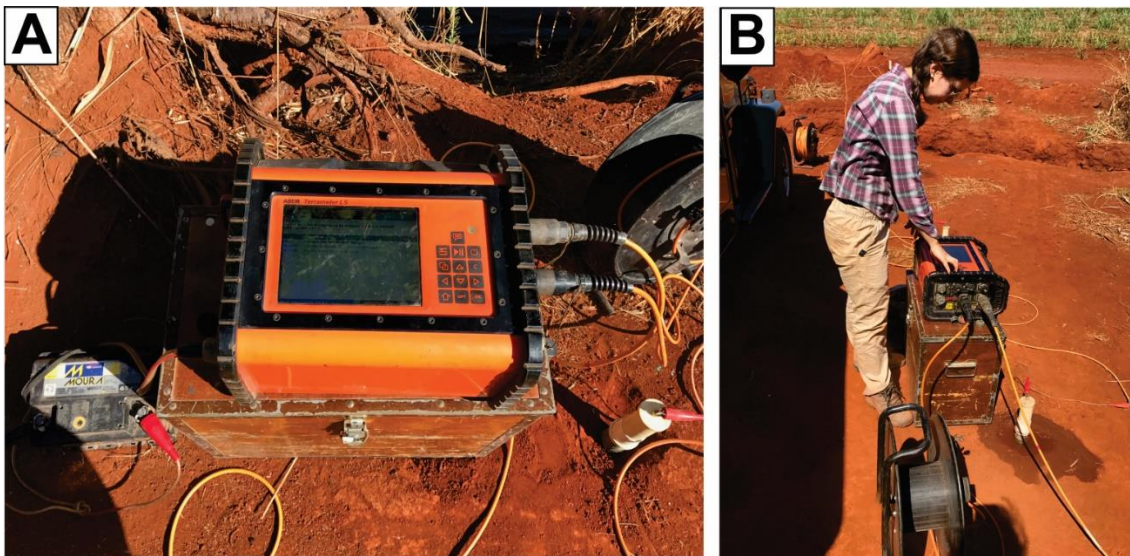


Fonte: Arquivo pessoal.

O equipamento utilizado para aquisição de dados de resistividade e cargabilidade foi o Terrameter LS, fabricado pela ABEM Instrument (Figura 5.4). O equipamento consiste em um módulo único de transmissão e recepção de sinais automatizados a partir de programação prévia, com 250 W de potência, resolução de $1 \mu V$ e corrente máxima de 2,5 A. O aparelho, através de ciclos periódicos de transmissão e recepção de sinais, realiza ensaios de Eletrorresistividade (ER), Polarização Induzida (IP) e Potencial Espontâneo (SP). Os resultados dos ensaios geofísicos são registrados em uma planilha (formato *.dat*) que pode ser acessada por interface USB (ABEM, 2012).

Para a aquisição de dados nas barragens foram utilizados os seguintes parâmetros: tempo de envio de corrente 1 s, corrente mínima de 200 mA e máxima de 500 mA, 2 janelas de leituras fixas e consecutivas de 100 ms e início da janela de leitura após o corte de corrente (*delay time*) de 0,2 s.

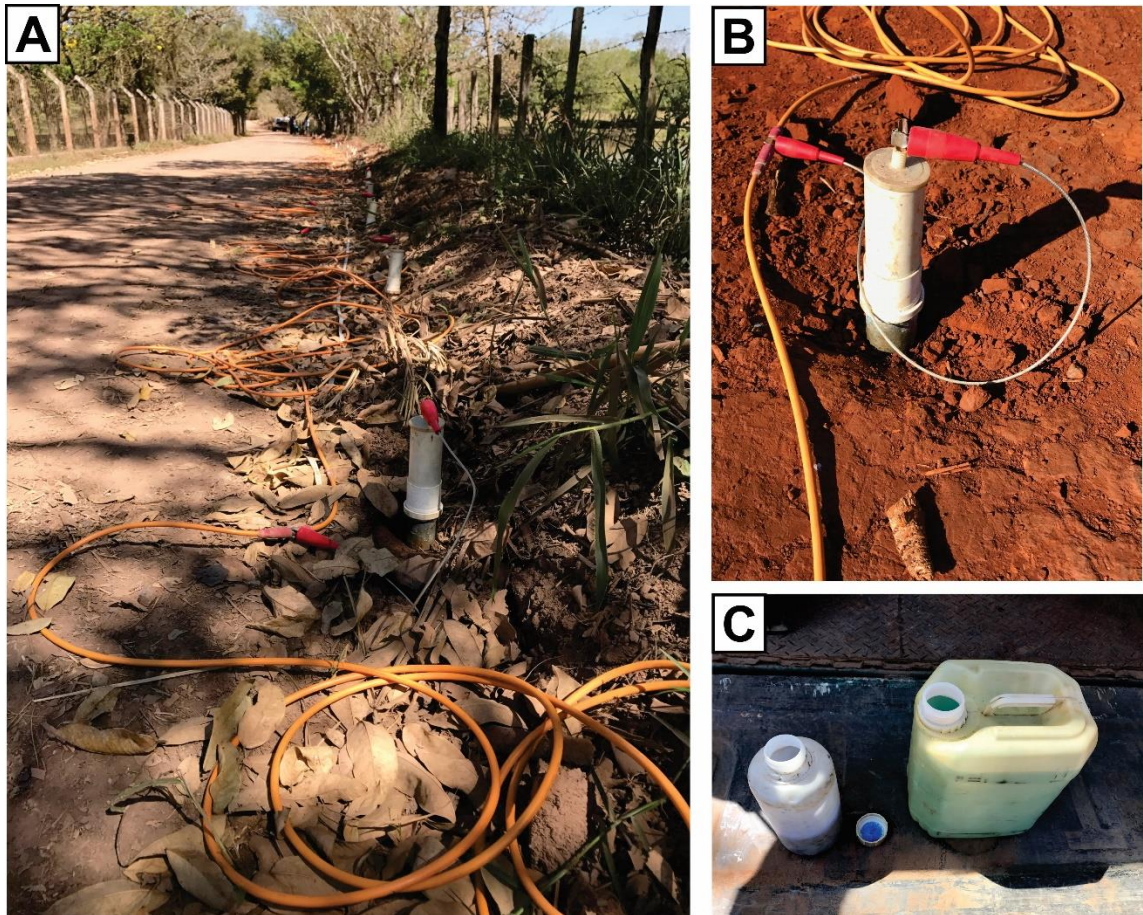
Figura 5.4 – (A, B) Resistivímetro ABEM Terrameter LS sendo utilizado na aquisição de dados geofísicos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Além do resistivímetro foram utilizados eletrodos cerâmicos não polarizáveis, compostos de uma haste de cobre e base porosa (Figura 5.5). Os eletrodos são preenchidos com uma solução supersaturada de CuSO_4 , permitindo a percolação no solo, com intuito de reduzir a resistência de contato e anular a geração de correntes parasíticas geradas pelo uso de eletrodos metálicos. Os eletrodos foram dispostos em pequenas covas feitas na superfície, com espaçamento de 2 metros. Para reduzir a resistência de contato, as pequenas covas foram umedecidas com água. Os eletrodos foram conectados a cabos para transmissão de corrente elétrica, enviada pelo equipamento.

Figura 5.5 – (A) Eletrodos conectados ao cabo de transmissão. (B) Eletrodo não polarizável com base porosa, fixado em uma pequena cova no chão. (C) Solução supersaturada de CuSO_4 .



Fonte: Arquivo pessoal.

5.2 Dados geotécnicos

Os dados geotécnicos foram adquiridos em dois dias de campo. No primeiro dia de campo foram feitos ensaios de permeabilidade de solo com o uso do Permeâmetro de Guelph em 6 pontos ao longo da barragem de Ipeúna (Figura 5.6). Os furos utilizados no ensaio tiveram uma profundidade de aproximadamente 50 cm em relação à superfície. Para realização dos furos foi utilizado um trado manual, além de uma escova para limpar os materiais soltos na parede do furo (Figura 5.7). Por fim foi utilizado um trado de base plana com objetivo de aplainar a base do furo.

No segundo dia de campo os ensaios de permeabilidade foram feitos em 6 pontos ao longo da barragem de Cordeirópolis (Figura 5.8).

Figura 5.6 – Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Ipeúna.



Fonte: Modificado de Google Earth, 2018.

Figura 5.7 – Trados utilizados para realização dos furos para ensaios de permeabilidade.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 5.8 – Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Modificado de Google Earth, 2018.

Para realizar o ensaio, o permeâmetro é colocado dentro do furo e permanece estabilizado com auxílio de um tripé. Na etapa seguinte é realizado o preenchimento dos reservatórios interno e externo com água (Figura 5.9) e feito o fechamento do equipamento com uma tampa, a fim de evitar a entrada de ar. Antes de iniciar o ensaio é necessário escolher qual reservatório será utilizado. Para utilização dos reservatórios interno ($2,15 \text{ cm}^2$) e externo ($35,22 \text{ cm}^2$), a válvula deve estar na posição X. Essa posição é recomendada para solos permeáveis. Para utilizar apenas o reservatório interno, recomendado para solos pouco permeáveis, a válvula deve estar na posição Y.

Figura 5.9 – (A) Preenchimento dos reservatórios com água. (B) Permeâmetro pronto para realização do ensaio.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após definição de qual reservatório usar, o permeâmetro é aberto através de uma haste, localizada na parte superior do equipamento. Assim que a haste é levantada, inicia-se a leitura de medidas. Quanto mais a haste é levantada, maior a pressão que a água dos reservatórios é submetida e, para obtenção de um melhor resultado, a haste é colocada em duas posições durante o ensaio. Na primeira parte do ensaio, a haste é levantada a uma altura de 5 cm e, na segunda parte, 10 cm. Quando a haste é levantada, a água começa a sair dos reservatórios e se infiltra no solo. A partir do momento que a água sai do reservatório, inicia um processo de formação de bolhas, que necessita de um tempo de estabilização.

A definição do intervalo de tempo para realização das medidas varia de acordo com a permeabilidade do solo. Nos pontos onde o solo estava mais permeável foi utilizado o intervalo de 1 minuto e no local onde o solo estava menos permeável, utilizou-se o intervalo de 2 minutos. Depois de definido o intervalo, inicia-se a leitura das medidas a partir da marcação, em centímetros, presente na superfície dos reservatórios (Figura 5.10). As medidas de tempo, intervalo de tempo, nível d'água e variação de nível d'água são anotados em uma planilha. As leituras de medidas terminam quando apresenta três medidas iguais, significando que a variação do nível d'água foi estabilizado. Assim que estabilizado é possível a determinação do valor de R_1 , que é a variação do nível d'água dentro do reservatório por minuto.

Figura 5.10 – Leitura e anotação das medidas de variação de nível d'água durante o ensaio de permeabilidade de solo.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com a estabilização e definição do R1, o ensaio passa para segunda etapa, onde a haste é levantada a uma altura de 10 cm, causando uma maior pressão no reservatório. O procedimento para realização das medidas é igual ao descrito anteriormente.

Para obtenção do valor do coeficiente de condutividade hidráulica (k), são utilizadas as seguintes fórmulas:

$$k = [(0,0041). (X). (R2) - (0,0054). (X). (R1)] \quad (12)$$

$$k = [(0,0041). (Y). (R2) - (0,0054). (Y). (R1)] \quad (13)$$

Onde:

- **k:** Condutividade hidráulica, em cm/s;
- **R1 e R2:** Taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H_1 (5 cm) e H_2 (10 cm) respectivamente, em cm/s;
- **X e Y:** Constantes correspondentes a área do reservatório d'água utilizado, em cm^2 .

6 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados geofísicos medidos são armazenados na memória do resistímetro Terrameter LS (ABEM Instrument) em um arquivo formato *.dat*. Após a transferência, via USB, para um computador, o arquivo de dados foi analisado e editado no *software* Surfer 8, desenvolvido pela Golden Software. Dados topográficos foram adicionados para cada linha de tomografia elétrica, com a finalidade de gerar o ajuste topográfico no modelo de inversão.

Para obtenção dos modelos de inversão 2D foi utilizado o *software* Res2dinv, desenvolvido pela Geotomo Software (GEOTOMO SOFTWARE, 2003). Inicialmente, os resultados são expressos em uma pseudo-seção de resistividade elétrica e/ou cargabilidade aparentes, onde cada um dos pontos investigado em subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica de acordo com o espaçamento adotado entre eletrodos e o arranjo utilizado na investigação. O uso da interpretação qualitativa através de pseudo-seções não reflete a distribuição de resistividade elétrica ou cargabilidade verdadeiras, nem a profundidade real do meio investigado.

Assim sendo, é necessário adotar uma série de técnicas numéricas que tornem possível uma interpretação quantitativa, ou seja, a geração de um modelo de subsuperfície que reflita da melhor maneira os dados reais. O *software* Res2dinv realiza o processamento de grandes conjuntos de dados em duas dimensões e determina um modelo bidimensional de resistividade e cargabilidade para a subsuperfície, a partir de técnicas de modelagem numérica com o método da inversão, com os dados adquiridos durante a etapa de aquisição em campo (GRIFFITHS & BARKER, 1993).

A inversão é um processo matemático que permite a determinação de um modelo idealizado de subsuperfície com base em um conjunto finito de dados observados, cuja resposta esteja em concordância com os valores medidos. O objetivo da inversão é determinar parâmetros do modelo, através de tentativas de ajuste da resposta do modelo aos dados observados, dentro de um limite de erro pré-estabelecido.

A inversão por suavização emprega o método matemático dos mínimos quadrados, e com isso, o *software* é capaz de reconhecer a subsuperfície terrestre como blocos retangulares, com valores constantes para o parâmetro investigado (DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE, 1990; LOKE; BARKER, 1996).

Após a incorporação de dados topográficos ao modelo, os resultados finais são gerados na forma de seções de resistividade e cargabilidade, em termos de distância x profundidade, em escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores de cor. O processamento feito pelo *software* tem como finalidade a redução da diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos, onde a diferença é expressa pelo erro RMS (*Root Mean Squared*) (LOKE; BARKER, 1996). O erro RMS é definido como uma medida estatística do desvio médio de uma quantidade de valores e que diminui a cada iteração durante a inversão dos dados geofísicos.

Após a geração dos modelos de inversão 2D, os arquivos foram salvos e, após análise dos valores, foi gerada uma escala única de valores com o intuito de comparação dos resultados obtidos com os dados geofísicos.

7 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, em duas etapas, os resultados obtidos no estudo. A primeira etapa apresenta os resultados geofísicos e geotécnicos da barragem localizada em Cordeirópolis; a segunda etapa apresenta os resultados geofísicos e geotécnicos da barragem de Ipeúna. Serão apresentados os dados obtidos durante o levantamento geofísico e durante os ensaios geotécnicos de permeabilidade do solo.

7.1 Barragem de Cordeirópolis

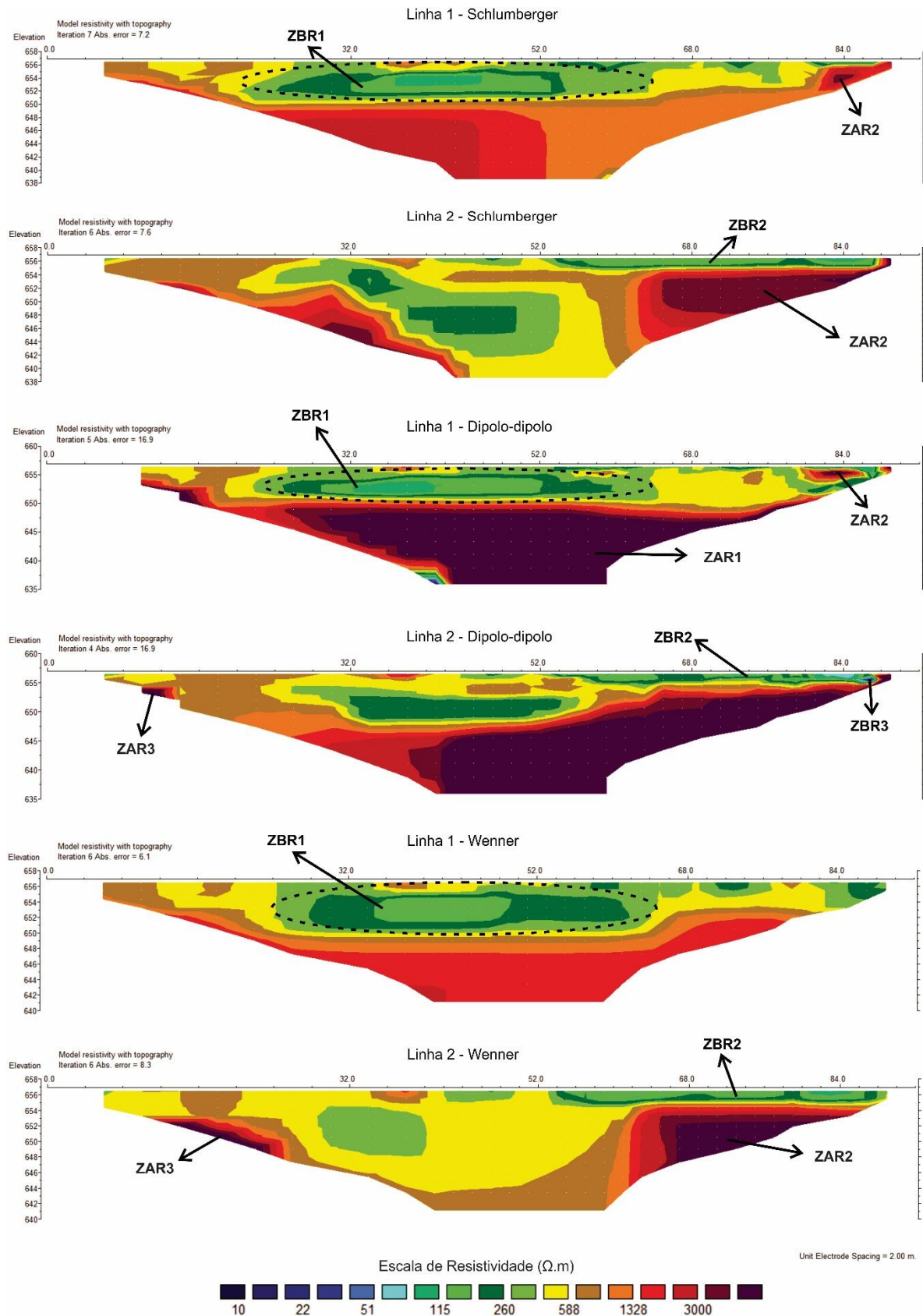
7.1.1 Resultados geofísicos

Os dados do levantamento geofísico de Eletrorresistividade e Polarização Induzida processados geraram modelos de inversão 2D para resistividade e cargabilidade. Para cada arranjo (Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner) foram geradas duas seções, que representam a linha 1 e linha 2.

7.1.1.1 Eletrorresistividade

Os dados de resistividade da barragem de Cordeirópolis apresentam um grande intervalo de variação de valores, portanto, as seis seções foram padronizadas em escala única, com variações de valores de resistividade entre 100 $\Omega.m$ e 3000 $\Omega.m$, onde as cores frias representam valores de baixa resistividade e cores quentes representam valores de alta resistividade, para que seja possível realizar uma análise comparativa (Figura 7.1).

Figura 7.1 – Seções de resistividade para linhas 1 e 2 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Dados da pesquisa.

Em uma primeira análise, as seções apresentam três zonas de alta resistividade (ZAR), chegando no valor máximo da escala (3.000 $\Omega.m$). A primeira zona (ZAR1) está localizada na região central da barragem, com início à 8 metros de profundidade, aproximadamente, e é melhor observada na linha 1, principalmente no arranjo Dipolo-dipolo. Essa área pode ser determinada como o substrato rochoso da área, composto por basaltos pertencentes a Formação Serra Geral.

A segunda zona de alta resistividade (ZAR2) está localizada no setor direito da barragem, entre as distâncias de 80 e 90 metros, em uma zona rasa, e é melhor definida no arranjo Dipolo-dipolo. A terceira zona (ZAR3) está localizada no início da barragem, entre as distâncias 12 e 25 metros, sendo melhor observada nas linhas 2 dos arranjos Dipolo-dipolo e Wenner.

Em contraste com as zonas de alta resistividade, existem zonas alongadas e rasas, de baixa resistividade (ZBR), concentradas na parte central e a direita do barramento. As zonas alongadas de baixa resistividade (ZBR1 e ZBR2) variam entre 115 $\Omega.m$ e 260 $\Omega.m$ e estão próximas à superfície até profundidades de aproximadamente 10 metros. Além disso, existe uma pequena zona de baixa resistividade (ZBR3), com valores menores, variando entre 10 $\Omega.m$ e 50 $\Omega.m$, no setor direito da barragem, a uma profundidade de 5 metros e é melhor observada na linha 2 do arranjo Dipolo-dipolo.

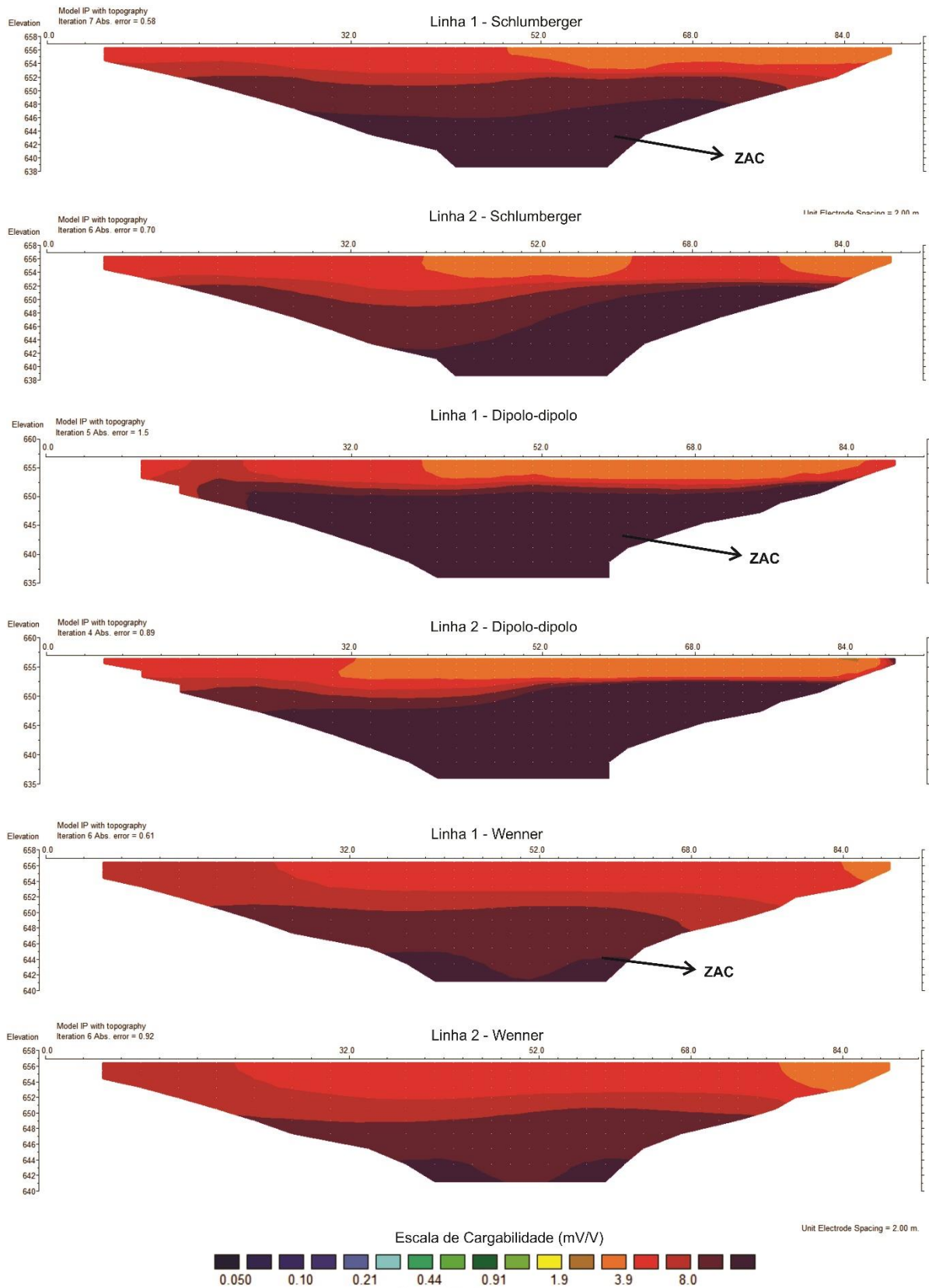
As zonas caracterizadas por baixas resistividades (até 115 $\Omega.m$) representam possíveis zonas de infiltração de água. Acima de 115 $\Omega.m$, inicia uma transição para uma zona menos saturada.

7.1.1.2 Polarização Induzida

Os valores de cargabilidade estão representados, em geral, por um pequeno intervalo de 0,05 mV/V a 8 mV/V na área, onde as cores frias caracterizam os baixos valores cargabilidade e as cores quentes caracterizam os valores de alta cargabilidade (Figura 7.2).

A análise dos resultados das seções de cargabilidade da barragem mostra que os três arranjos apresentam resultados semelhantes em relação aos valores de cargabilidade.

Figura 7.2 – Seções de cargabilidade para linhas 1 e 2 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nas seções, o valor mais baixo de cargabilidade é de 3,9 mV/V e é caracterizado pela cor laranja. Os valores de cargabilidade aumentam de maneira gradativa com a profundidade, atingindo o maior valor (8 mV/V) a partir dos 10 metros de profundidade, aproximadamente.

A zona de alta cargabilidade (ZAC), representada pela cor roxa, apresenta valores de 8 mV/V e caracteriza o substrato rochoso da área, que é constituído por basaltos.

Em geral, os valores de cargabilidade variam pouco, em um intervalo de 3,9 mV/V a 8 mV/V, representados pelas cores laranja, vermelho e roxo, e não apresentam contrastes ao longo da seção.

7.1.2 Resultados geotécnicos

Os resultados dos ensaios geotécnicos foram obtidos através dos ensaios de permeabilidade do solo. Foram obtidos dados de 6 pontos ao longo da barragem (Tabela 7.1). Todos os valores coletados em campo foram calculados com uso das equações apresentadas no Capítulo 5 (item 5.2). Para os ensaios na barragem de Cordeirópolis foi utilizado apenas o valor de X (35,22 cm²), pois em todos os pontos foi utilizado o reservatório externo e interno.

Tabela 7.1 – Valores de permeabilidade do solo da barragem de Cordeirópolis.

Pontos	Valor de permeabilidade (cm/s)
P1	$3,41 \times 10^{-4}$
P2	$2,03 \times 10^{-3}$
P3	$- 2,5 \times 10^{-4}$
P4	$1,32 \times 10^{-3}$
P5	$2,9 \times 10^{-3}$
P6	$1,32 \times 10^{-3}$

Fonte: Dados da pesquisa.

O resultado da permeabilidade calculado no ponto 3 apresentou valor negativo de k , portanto, foi excluído da análise por não representar o real valor de permeabilidade do solo. De acordo com Reynolds et al. (1985) diversos fatores podem explicar a

ocorrência de resultados negativos, como erros de medição quando não atingido o regime permanente, erros de medição da vazão devido à presença de bolhas de ar, pequena variação espacial em escala das propriedades hidráulicas do solo, ar preso no solo, ou variação espacial devido à perturbação das características do solo.

Com exceção do o valor de permeabilidade do P3, os resultados dos outros 5 pontos apresentam valores de k na ordem de 10^{-3} a 10^{-4} , sendo considerado baixo o grau de permeabilidade amostrado.

7.2 Barragem de Ipeúna

7.2.1 Resultados geofísicos

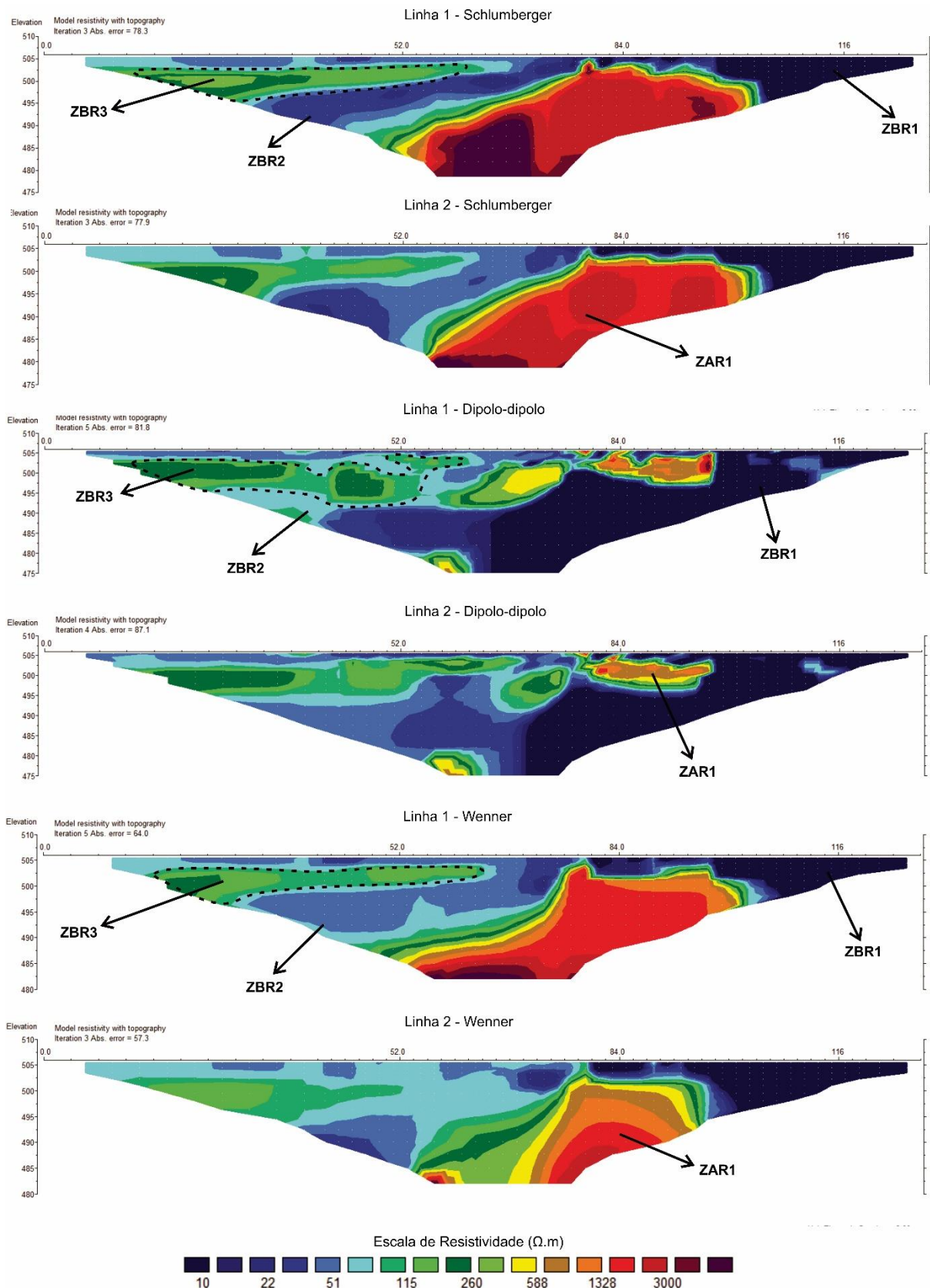
Assim como na barragem de Cordeirópolis, os dados obtidos nos ensaios geoeletricos na barragem de Ipeúna resultaram em modelos de inversão 2D de resistividade e cargabilidade.

7.2.1.1 Eletrorresistividade

Foram geradas duas seções para cada arranjo estudado (Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner), que representam as linhas 1 e 2 (Figura 7.3). A linha 1 está próxima ao reservatório 1 e a linha 2 está próxima ao reservatório 2, ao lado do lago principal do Pesqueiro Quilombo. As seções também foram padronizadas em escala única com a finalidade de comparação no Capítulo 8.

Ao analisar as seções é possível observar um predomínio de porções com valores baixos de resistividade, com intervalo de valores entre $10 \Omega.m$ a $50 \Omega.m$. A área com menor valor ($10 \Omega.m$) tem início na distância de 80 metros e caminha até o final da barragem (à direita da seção) (ZBR1). Atinge profundidades de até 30 metros no arranjo Dipolo-dipolo, porém, nos arranjos Schlumberger e Wenner alcança o limite de 10 metros. Essa zona (ZBR1) pode ser caracterizada por solo argiloso e substrato saturado argiloso.

Figura 7.3 – Seções de resistividade para linhas 1 e 2 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na metade inicial também existem zonas de baixa resistividade, mas estas apresentam valores maiores do que a zona à direita (ZBR2). A parte central exhibe valores de 20 Ω .m a 40 Ω .m e a área no início da barragem apresenta valores de 50 Ω .m, representados pela cor azul clara.

No início da seção até a distância de 76 metros ocorrem zonas mais alongadas, no meio da área de baixa resistividade (ZBR3). Essas zonas são relativamente rasas e alcançam profundidades de até 10 metros aproximadamente. Apresentam valores entre 115 Ω .m e 260 Ω .m, sendo representada pelas cores verde azulado, verde claro e, por fim, verde escuro.

Em contraste com a predominância de baixos valores de resistividade nas seções, existe uma zona mais resistiva (ZAR1), localizada entre as distâncias 78 e 98 metros, aproximadamente. No arranjo Dipolo-dipolo, a área atinge profundidade máxima de 10 metros. Porém, a anomalia de alta resistividade alcança profundidades de quase 30 metros nos arranjos Schlumberger e Wenner e abrangem uma área maior conforme a profundidade.

No arranjo Dipolo-dipolo, a área resistiva é pequena e os maiores valores atingidos estão entre 1328 Ω .m a 2000 Ω .m. Nos outros dois arranjos, Schlumberger e Wenner, o maior valor atingido chega a 3000 Ω .m.

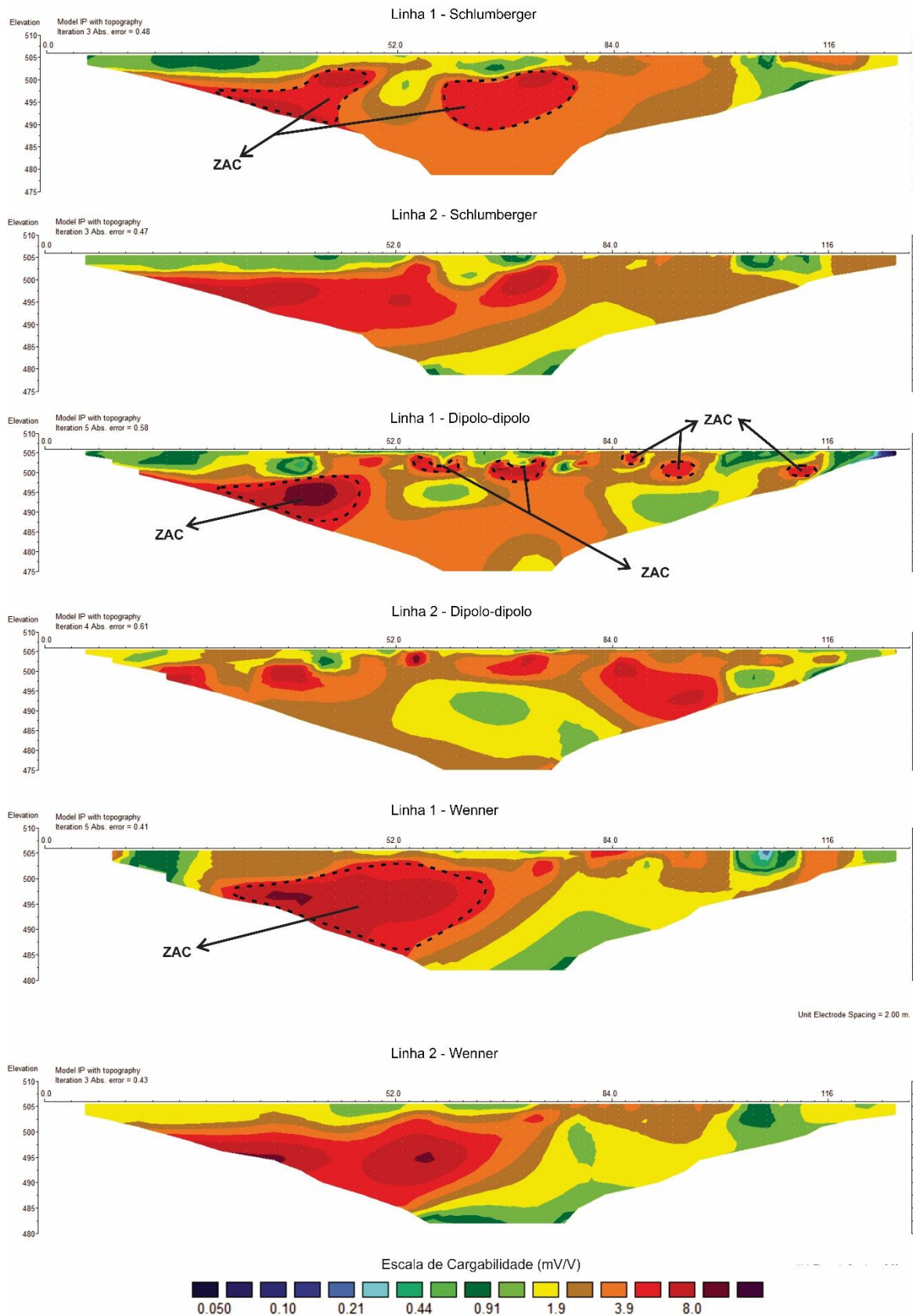
7.2.1.2 Polarização Induzida

Os modelos de cargabilidade apresentam intervalos de valores entre 0,1 mV/V a 8 mV/V, onde as cores frias caracterizam os baixos valores de cargabilidade e as cores quentes caracterizam os valores de alta cargabilidade (Figura 7.4). Os valores são considerados baixos e há uma predominância de valores acima de 0,9 mV/V.

De maneira geral, as seções apresentam valores entre 1,9 mV/V e 3,9 mV/V na região central da barragem, desde áreas rasas até áreas profundas, que atingem 30 metros aproximadamente.

O que chama a atenção ao analisar as seções são as zonas de alta cargabilidade (ZAC) que são representadas por formatos arredondados, em sua maioria, a ovalados. Os valores alcançam 8 mV/V em dois pontos: um localizado na linha 1 do arranjo Dipolo-dipolo e Wenner, na distância de 36 metros e cerca de 10 metros de profundidade. O outro ponto está na região central, na distância de 56 metros.

Figura 7.4 – Seções de cargabilidade para linhas 1 e 2 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Dados da pesquisa.

7.2.2 Resultados geotécnicos

Os resultados dos ensaios geotécnicos foram obtidos através dos ensaios de permeabilidade do solo em 6 pontos ao longo da barragem de Ipeúna (Tabela 7.2). Para o cálculo dos valores de permeabilidade (k) na barragem de Ipeúna foram utilizados os valores de X ($35,22 \text{ cm}^2$) e Y ($2,15 \text{ cm}^2$), pois nos pontos P1 a P5 foi utilizado apenas o reservatório interno; no P6 foi necessário a utilização dos reservatórios interno e externo.

Tabela 7.2 – Valores de permeabilidade do solo para barragem de Ipeúna.

Pontos	Valor de permeabilidade (cm/s)
P1	$5,5 \times 10^{-5}$
P2	$1,18 \times 10^{-4}$
P3	$- 1,8 \times 10^{-5}$
P4	$2,01 \times 10^{-5}$
P5	$- 3,0 \times 10^{-5}$
P6	$2,47 \times 10^{-4}$

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados da permeabilidade calculados nos pontos 3 e 5 apresentaram valores negativo de k , portanto, foram excluídos da análise por não representar o real valor de permeabilidade do solo. O motivo para os valores negativos não serem utilizados foi explicado no item 7.1.2.

Com a exclusão dos valores negativos de permeabilidade do P3 e P5, os resultados do P1, P2, P4 e P6 apresentam valores de k na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} , sendo considerado baixo o grau de permeabilidade do solo amostrado na barragem de Ipeúna.

8 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO

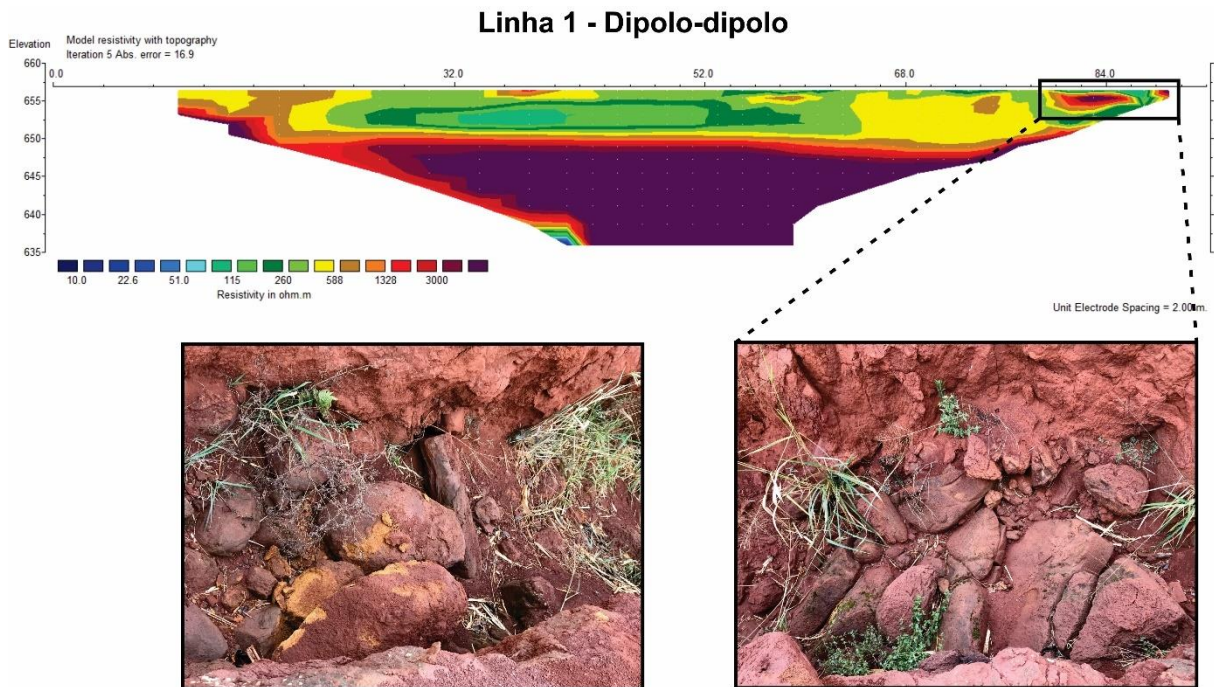
8.1 Barragem de Cordeirópolis

A barragem de Cordeirópolis foi construída em um local de afloramento da Formação Serra Geral. A área é composta por solo laterítico argiloso, fruto da alteração de rochas básicas. Como mostra a Tabela 4.1, as rochas ígneas possuem altos valores de resistividade, ou seja, são rochas onde a passagem de corrente elétrica é mais difícil. A maior zona de alta resistividade da barragem de Cordeirópolis está localizada na região central, com valores que chegam a atingir a marca de 3000 Ω .m. Esses valores coincidem com o intervalo de valores de resistividade apresentados pelo basalto e por estar localizada em uma área marcada pela Formação Serra Geral, essa zona foi determinada como o substrato rochoso.

Outra zona de alta resistividade foi estabelecida no final do barramento, próximo as distâncias de 80 e 90 metros. Durante a fase de aquisição de dados foi observado a presença de uma vala que foi escavada. No interior da vala há a presença de blocos e matacões de basalto alterado e esta área coincide com a zona de alta resistividade determinada na seção (Figura 8.1).

Acima da zona de alta resistividade central, existe contraste com zonas alongadas de baixa resistividade. Os valores variam de 115 Ω .m a 260 Ω .m e os valores mais baixos, representados pela cor verde azulado, são encontrados na parte central do interior das zonas alongadas, de coloração verde claro e escuro. Os arranjos Dipolo-dipolo e Schlumberger foram os que apresentaram os melhores resultados para análise dessa zona. As resistividades até 115 Ω .m foram interpretadas como uma possível zona de infiltração de água, porém, esse intervalo de resistividade foi encontrado apenas na linha 1, localizado a montante, o que diminui a possibilidade de ocorrência de *piping* no momento. As áreas com valores acima de 115 Ω .m foram interpretadas como zonas que sofreram perda de saturação.

Figura 8.1 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) da barragem de Cordeirópolis. O retângulo indica a área de alta resistividade onde há uma vala com blocos de basalto.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os resultados de Polarização Induzida não apresentaram contrastes em nenhuma das 6 linhas geradas. Em uma análise integrada com a resistividade, há uma correlação de dados em relação ao substrato rochoso, principalmente nas seções onde foi utilizado o arranjo Dipolo-dipolo. Tanto na linha 1, como na linha 2, é possível observar que as áreas com maiores resistividades (3000 $\Omega.m$) condizem com as áreas de maior cargabilidade (8 mV/V).

Os dados geotécnicos obtidos com os ensaios de permeabilidade do solo com o permeâmetro de Guelph apresentou bons resultados, pois foi possível analisar mais que 83% dos dados coletados, visto que em um dos pontos o resultado do coeficiente de permeabilidade (k) apresentou resultado negativo. Os coeficientes de permeabilidade apresentaram valores na escala de 10^{-3} a 10^{-4} , sendo o menor valor de k foi $3,41 \times 10^{-4}$ no P1 e o maior valor foi $1,32 \times 10^{-3}$ nos pontos P4 e P6.

Na Tabela 8.1 é feita uma comparação dos valores do coeficiente de permeabilidade (k) com o grau de permeabilidade determinado por Terzaghi e Peck (1967) e o tipo de solo determinado por Mello e Teixeira (1967).

Tabela 8.1 – Relação dos valores de condutividade hidráulica e tipos de materiais.

Coeficiente de permeabilidade k (cm/s)	Grau de permeabilidade Terzaghi e Peck (1967)	Tipo de solo Mello e Teixeira (1967)
10^9 a 1	Alto	Pedregulhos e areia
1 a 10^{-1}	Alto	Areias
10^{-1} a 10^{-3}	Médio	Areias
10^{-3} a 10^{-5}	Baixo	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
10^{-5} a 10^{-7}	Muito baixo	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
$< 10^{-7}$	Praticamente impermeável	Argilas

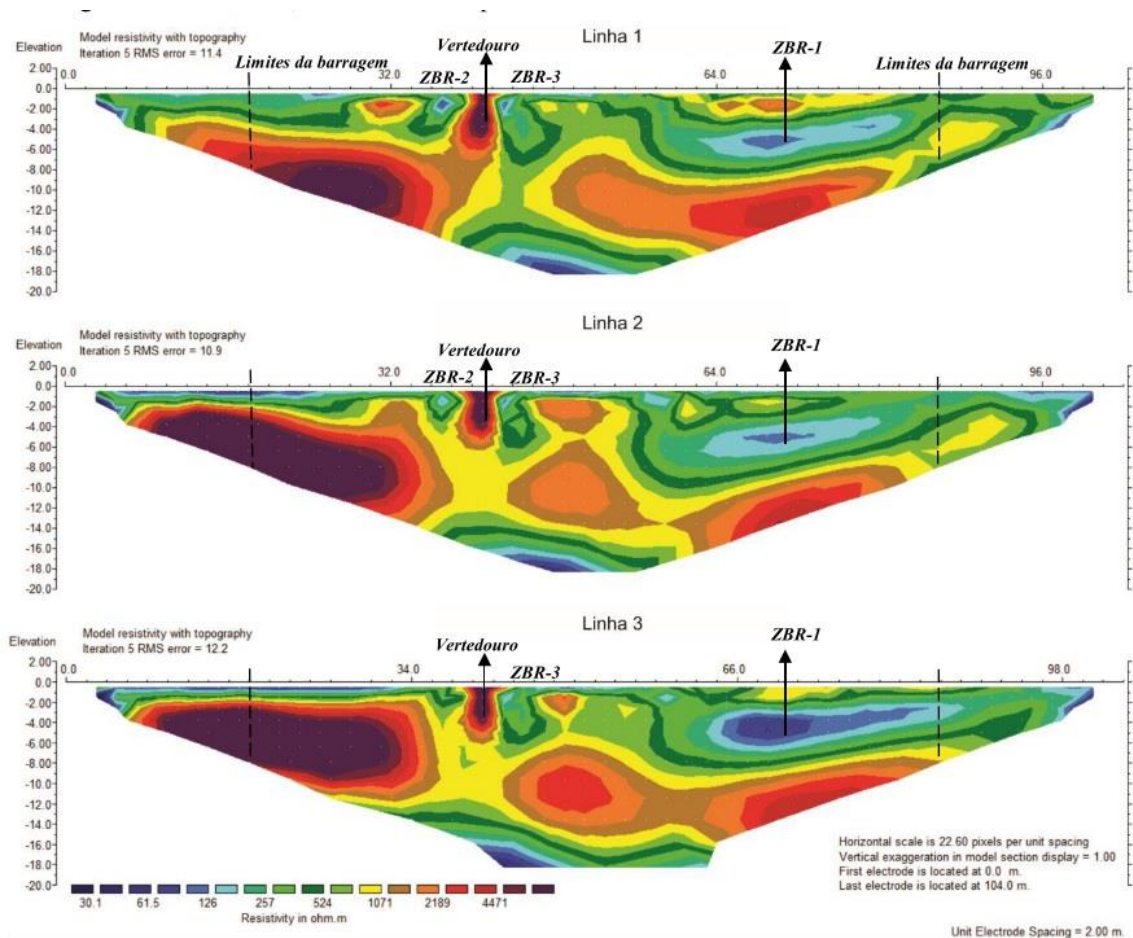
Fonte: Terzaghi; Peck, 1967; Mello; Teixeira, 1967.

De acordo com os valores fornecidos pelo coeficiente de permeabilidade, o grau de permeabilidade da barragem de Cordeirópolis é baixo, sendo considerado um bom material para construção do corpo de uma barragem por ser um material onde há maior dificuldade para ocorrência de infiltração.

A barragem de Cordeirópolis foi estudada anteriormente por Camarero (2016), que realizou levantamento geofísico com o método da Eletroresistividade e arranjo Wenner. Foram feitas 3 linhas de 104 metros de tomografia elétrica (312 m no total), onde a linha 1 está localizada próxima à jusante e a linha 3 próxima à montante do barramento (Figura 8.2). Em comparação com os estudos realizados neste presente trabalho foi possível identificar que em ambos os levantamentos há a presença de infiltração no corpo da barragem. Ao analisar as seções geofísicas foi possível correlacionar algumas zonas com as das seções do estudo, principalmente a zona de baixa resistividade rasa e a zona de alta resistividade que ocorre no início da seção, que corresponde ao final da seção geofísica do atual trabalho, pois o ponto inicial do levantamento dos dois trabalhos começou em sentidos opostos. Os menores valores de resistividade, representados pela zona de baixa resistividade ZBR-1 de Camarero (2016) está localizada mais ao final da seção, diferente do presente trabalho, onde esta zona está localizada mais na região central da barragem.

Camarero (2016) concluiu que, pelo fato da ZBR-1 estar maior na linha a montante do que a jusante, a barragem pode estar saturada nesta região e há a possibilidade de um caminho preferencial de fluxo, que pode ser interpretado como um piping. No presente trabalho não é possível identificar a formação de piping, mas foi determinada uma zona saturada e de infiltração na região central da barragem.

Figura 8.2 – Seções de resistividade para linhas 1, 2 e 3 na barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Camarero (2016).

8.2 Barragem de Ipeúna

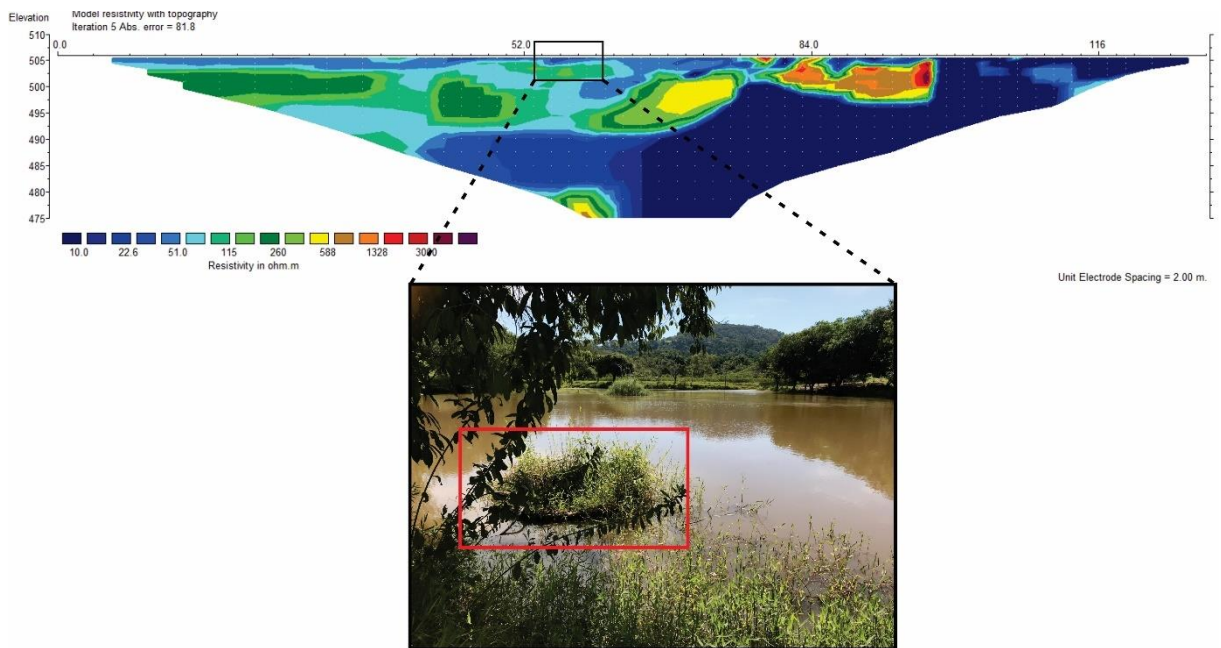
A barragem de Ipeúna é localizada em uma área onde afloram rochas do Grupo Itararé. A barragem está localizada entre dois reservatórios de água. O primeiro está localizado ao norte da barragem, com nível d'água elevado, próximo a superfície (1 metro, aproximadamente); o segundo reservatório encontra-se a sul da barragem, e apresenta nível d'água um pouco mais baixo, comparado com o reservatório norte (2

metros). Durante a aquisição de dados, a linha 1 ficou ao lado do reservatório 1 e a linha 2 ao lado do reservatório 2.

No reservatório 1 há a presença de um vertedouro de concreto, localizado aproximadamente na distância de 56 metros (Figura 8.3). A linha 1 apresenta uma concentração de valores de baixa resistividade, atingindo valores de 115 Ω .m. Como pode ser visto na foto, o vertedouro não se encontra em condições muito boas de conservação, visto a quantidade de plantas que se encontra na sua borda.

A presença do vertedouro, junto com os baixos valores de resistividade podem ser interpretados como uma possível passagem de água, ligando os dois reservatórios, onde o reservatório localizado à norte abastece o reservatório 2.

Figura 8.3 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) da barragem de Ipeúna. O retângulo indica a localização do vertedouro que liga os dois reservatórios.



Fonte: Arquivo pessoal.

A predominância dos baixos valores de resistividade reflete a geologia do local. A litologia da barragem apresenta uma variação faciológica, sendo que no início da linha são encontrados sedimentos mais areno-siltosos, com transição para uma predominância de silte na porção central e a área central até o fim da barragem é composto por um material mais argiloso. De acordo com Reynolds (1997), as rochas sedimentares são mais condutivas, ou seja, apresentam baixos valores de resistividade, por causa do seu alto teor de fluídos nos poros. Isso resulta em uma

maior importância na resistividade dos fluídos intersticiais do que da rocha em si. Os valores podem variar conforme grau de compactação, grau de intemperismo, idade, tamanho e forma do grão, entre outros.

A região com menor resistividade, representada pela cor azul marinho e que apresenta valor de resistividade $10 \Omega.m$, ocorre em áreas argilosas, com solo e substrato rochoso saturado, onde pode ser interpretado como possíveis infiltrações, tanto na barragem, como no substrato rochoso. A região central é caracterizada por um silte mais argiloso que também está saturado. O início da linha, à esquerda da seção é composto por um silte com porções mais arenosas. Durante os ensaios geotécnicos foi possível observar que a água infiltrava com mais facilidade no solo, por apresentar maior teor de areia.

Assim como na barragem de Cordeirópolis, as infiltrações ocorrem até um valor de $115 \Omega.m$, acima desse valor, com o aumento da resistividade, há perda de saturação.

Devido à grande presença de material argiloso no solo, as seções de cargabilidade apresentaram algumas zonas de contraste. A polarização de membrana é maior quando há minerais de argila, pois apresentam pequenos poros. Com a ausência de minerais metálicos, a condução que ocorre é a eletrolítica. De acordo com Kearey et al. (2002) a resposta IP é maior em camadas com misturas de areia e argila do que em camadas argilosas pura. As argilas puras, camadas arenosas, e camadas siltosas apresentam, respectivamente baixa, intermediária e alta cargabilidade.

Ao correlacionar as seções, em uma análise integrada, é observado que a área mais argilosa da barragem apresenta os valores mais baixos de cargabilidade apresentados na seção, entre $0,9 \text{ mV/V}$ e $1,9 \text{ mV/V}$. As maiores cargabilidades são encontradas na região central e no início da barragem, onde há predomínio de silte argiloso a silte arenoso. Portanto, as zonas mais polarizadas são, provavelmente, representadas por uma mistura de argila e areia, e onde o fluxo de água está mais acelerado.

Os dados geotécnicos apresentaram resultados satisfatórios, sendo que em apenas 2 pontos foram obtidos valores negativos do coeficiente de permeabilidade (k), portanto, houve aproveitamento de 66,6% dos dados coletados. O menor valor de k calculado foi de $5,5 \times 10^{-5}$ no P1 e o maior valor foi $1,18 \times 10^{-4}$ no P2.

De acordo com a Tabela 8.1, o grau de permeabilidade definido por Terzaghi e Peck (1967) define que a barragem de Ipeúna apresenta baixo grau de permeabilidade, pois está no intervalo de valores de 10^{-4} e 10^{-5} . Os valores são adequados, já que a barragem apresenta grande quantidade de silte e argila em sua composição.

8.3 Comparação dos arranjos

Durante a aquisição de dados geofísicos nas barragens foram utilizados três tipos de arranjos diferentes: Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo. Cada arranjo apresenta suas vantagens e desvantagens em relação à profundidade de investigação, resolução das estruturas verticais e horizontais e sensibilidade a variações laterais. A Tabela 8.2 apresenta as principais vantagens e desvantagens de cada arranjo.

Tabela 8.2 – Comparação entre arranjos utilizados na aquisição de dados geofísicos.

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

Fonte: Reynolds, 1997; Lowrie, 2007.

Como foi possível observar nas seções, o arranjo Dipolo-dipolo foi o que apresentou os melhores resultados. Devido sua alta sensibilidade a variações horizontais, o arranjo representou de melhor maneira a espessura das camadas e

seus contatos. Os arranjos Schlumberger e Wenner representaram as camadas de maneira mais distorcida, devido à maneira como o campo elétrico é propagado.

Mesmo os arranjos apresentando características diferentes, em todas as 6 seções de resistividade (2 de cada arranjo) foi possível determinar zonas alongadas que foram interpretadas como possíveis infiltrações de água na barragem.

8.4 Comparação das barragens

O grande objetivo do trabalho é a identificação de possíveis zonas de fluxo e infiltração no corpo das barragens e observar o diferente tipo de comportamento das propriedades físicas em diferentes materiais.

Primeiro, as barragens estão localizadas em regiões de litologias diferentes: a barragem de Cordeirópolis na Formação Serra Geral e a barragem de Ipeúna no Grupo Itararé. A composição dos diferentes tipos litológicos apresenta diferenças em valores de resistividade e cargabilidade. A Tabela 8.3 apresenta dados comparativos sobre o material encontrado em cada barragem.

Tabela 8.3 – Comparação dos dados das barragens.

Parâmetros	Barragem de Cordeirópolis	Barragem de Ipeúna
Menor valor de resistividade	100 Ω .m	10 Ω .m
Maior valor de resistividade	8000 Ω .m	8000 Ω .m
Predominância de resistividade	Altos valores de resistividade	Baixos valores de resistividade
Menor valor de cargabilidade	3,9 mV/V	0,10 mV/V
Maior valor de cargabilidade	8 mV/V	8 mV/V
Predominância de cargabilidade	Altos valores de cargabilidade	Baixos valores de cargabilidade
Menor valor de coeficiente de permeabilidade	$3,41 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-5}$
Maior valor de coeficiente de permeabilidade	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-4}$

Fonte: Dados da pesquisa.

Em geral, os valores de resistividade e cargabilidade dos materiais são maiores na barragem de Cordeirópolis, por apresentar substrato rochoso basáltico e devido ao solo de alteração do basalto. Os menores valores são encontrados na barragem de Ipeúna devido a composição ser de rochas sedimentares de baixa permeabilidade e solos de permeabilidade moderada, que, como dito anteriormente, apresenta menores valores de resistividade devido ao alto teor de fluídos nos poros.

9 CONCLUSÃO

O método da Eletrorresistividade apresentou resultados satisfatórios, pois possibilitou a determinação de zonas de infiltração de água nas barragens de Cordeirópolis e Ipeúna. O método da Polarização Induzida apresentou resultados insatisfatórios na barragem de Cordeirópolis; na barragem de Ipeúna os resultados foram melhores, devido à composição do material. Porém, o método é recomendado para complementação do estudo de Eletrorresistividade, uma vez que a aquisição de dados é feita de maneira conjunta com o Resistivímetro ABEM Terrameter LS. A análise individual dos dados de Polarização Induzida não apresentaria resultados satisfatórios como a Eletrorresistividade.

Em relação aos arranjos utilizados no levantamento geofísico, o que melhor ofereceu resultados foi o Dipolo-dipolo, pois é o arranjo que apresentou a melhor resolução, comparado com Schlumberger e Wenner. Os contatos litológicos nas seções Dipolo-dipolo apresentam a melhor representação, pois nos outros dois arranjos há a distorção devido a forma como o campo é propagado.

Os ensaios de permeabilidade do solo com uso do permeâmetro de Guelph também apresentou resultados equivalentes para as duas barragens, com ambas sendo classificadas com grau de permeabilidade baixo. Em conjunto com os métodos geofísicos, o ensaio geotécnico mostrou ser uma ferramenta útil e de fácil aplicação, capaz de fornecer informações que agregam a interpretação do resultado.

Apesar do sucesso dos resultados nas seções de resistividade para determinar as possíveis zonas de infiltração, é recomendado o uso de métodos diretos para a confirmação da ocorrência de infiltração, como construção de poços e uso de piezômetro. Além disso, é recomendado a realização de ensaios e estudos durante as etapas de projeto, construção e monitoramento de barragens.

Os acidentes de rompimento de barragens que ocorreram em Mariana – MG, em 2015, e em Brumadinho – MG, em 2019 poderiam ter sido evitados caso houvesse uma sistemática de monitoramento geofísico destas barragens. O tema vem sendo mais abordado, com objetivo de evitar que ocorram mais acidentes e para utilizar métodos que auxiliem na prevenção de rompimentos. A maioria dos acidentes e incidentes ocorrem em barragens de usos múltiplos, e estas são majoritariamente barragens de terra. As duas barragens estudadas no trabalho são caracterizadas

como de terra, o que mostra que é possível a realização de ensaios geofísicos e geotécnicos nessas barragens e evitar futuros acidentes/incidentes.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO SOTO, M. A. **Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados**. 1999. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

ALMEIDA, F. F. M. de. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. Boletim Instituto Geográfico e Geológico, n. 41, p. 169-263, 1964.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2016**. Brasília, 225 p, 2017.

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

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

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

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:750.000**. Ministério de Minas e Energias, versão 2.0, 2006.

CULLEN, A. H. **Rios Prisioneiros: A História das Barragens**. Belo Horizonte: Ed. Editora Itatiaia Limitada de Belo Horizonte, 1964.

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, v. 55, p. 1613- 1624, 1990.

FOSTER, M. et al. **The statistics of embankment dam failures and accidents**. Canadian Geotechnical Journal, v. 37, n. 5, p. 1000-1024, 2000.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

G1 – GLOBO. **Sobe para 166 o número de mortos identificados na tragédia da Vale, em Brumadinho**. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/15/sobe-para-166-o-numero-de-mortos-identificados-na-tragedia-da-vale-em-brumadinho.ghtml>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

GEOMOTO SOFTWARE. RES2DINV, version 3.53, Rapid 2D resistivity & IP inversion using the least-square method - Geoelectrical Imaging 2-D & 3D, Geotomo Software, Penang, Malaysia, 129 f. 2003.

GANDOLFO, O.C.B. **Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa**. 2007. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GRIFFITHS, D. H.; BAKER, R. D. **Two-dimensional resistivity imaging and Modeling in areas of complex geology**. Journal of Applied Geophysics, v. 29, p. 211-226, 1993.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4. ed. Wiley & Sons, Inc., 1993.

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

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/publicadas/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1469-hectares-de-terras>.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados Climáticos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>. Acesso em 15 de janeiro de 2019.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo. Escala 1:500.000**. V.1. São Paulo, 1981.

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

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

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

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE-São Simão**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

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

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

LOKE, M. H.; BAKER, R. D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p. 131-152, 1996.

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

LOU, W. C. **Mathematical modeling of earth dam breaches**. 1981. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Estado do Colorado, Colorado, Estados Unidos, 1981.

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

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

MCDANIEL, T. N. **Design of small dams**. 3. Ed. A Water Resources Technical Publication – United States Department of the Interior Bureau of Reclamation.1987.

MELLO, V. F. B; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica de solos**. São Carlos: Escola de Engenharia, 1967.

MICHALIS, P. et al. Geophysical Assessment of Dam Infrastructure: the Mugdock Reservoir Dam Case Study. In: **3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring**. Viena, 2016.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A B.; SCHENEIDER, R.L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1994.

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

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

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. 2009. 149f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de engenharia civil e ambiental da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

POWLEDGE, G. R. et al. **Mechanics of overflow erosion on embankments**. II: Hydraulic and design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 115, n. 8, p. 1056-1075, 1989.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; CLOTHIER, B. E. **The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow**. *Soil Science*, v. 139, n. 2, p. 172-180, 1985.

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

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

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal. V.1. 118p, 2017.

SAAD, A. R. **Estratigrafia do Subgrupo Itararé no centro e sul do Estado de São Paulo**. 1977. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1997.

ROSS, J.L.S; MOROZ, I.C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo Escala 1:500.000**. Departamento de Geografia FFLCH-USP-IPT. Fapesp, São Paulo, 1997.

SCHIBELSCKY, M. L. N. O. S. et al. Integração de métodos geoeletricos na investigação de percolações anômalas em barragens de terra: caso da barragem de Santa Helena – BA. In: **Anais do 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. São Paulo, 2018.

SCHNEIDER, R. L. et al. **Revisão estratigráfica da bacia do Paraná**. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro De Geologia, 1974.

SJÖDAHL, P. et al. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. **Environmental Geology**, v. 49, n. 2, p. 267-273, 2005.

SOUSA, M. O. L. **Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau d'Alho e Jibóia – centro do Estado de São Paulo**. 2002. 227 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

SUMNER, J.S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277 p. 1976.

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

UOL – UNIVERSO ONLINE. **Ao menos 305 km do Rio Paraopeba foram contaminados por rejeito da Vale**. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2019/02/14/ao-menos-305-km-do-rio-paraopeba-foram-contaminados-por-rejeito-da-vale.htm>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2019.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VORONKOV, O. K. et al. Geophysical methods and identification of embankment dam parameters. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Site Characterization (ISC-2)**. p. 593-599, 2004.

ZAINE, J. E. **Geologia da formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)**. 1994. 90 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1994.

ZALÁN, P. V. et al. Bacia do Paraná. **Origem e evolução das bacias sedimentares**, p. 135-168, 1990.

APÊNDICE A – FICHAS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE DO SOLO

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P1 - Barragem de Ipeúna (SP)		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	5,7	0,7	0,7
3	2	1	6,3	0,8	0,8
4	3	1	7	0,7	0,7
5	4	1	7,7	0,7	0,7
6	5	1	8,4	0,7	0,7
7					
8					
9					
10					
constante =			0,7	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	9,7	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	11	1,3	1,3
3	2	1	12,3	1,3	1,3
4	3	1	13,7	1,4	1,4
5	4	1	15	1,3	1,3
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			1,3	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO = Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos, são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras (intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		R1 = R1 / 60 =	0,0116	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		R2 = R1 / 60 =	0,0216	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K =		{(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)}	= 0,000913	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios, interno e externo X = 35,22 cm²					
ou					
II - K =		{(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)}	= 0,000055	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm²					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P2 - Barragem de Ipeúna (SP)		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	16	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	18,6	2,6	2,6
3	2	1	21,4	2,8	2,8
4	3	1	23,6	2,2	2,2
5	4	1	26,3	2,7	2,7
6	5	1	28,2	1,9	1,9
7	6	1	30,1	1,9	1,9
8	7	1	32	1,9	1,9
9					
10					
constante =			1,9	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	22,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	26	3,5	3,5
3	2	1	29,3	3,3	3,3
4	3	1	32,6	3,3	3,3
5	4	1	35,9	3,3	3,3
6	5	1	39	3,1	3,1
7	6	1	42	3	3
8					
9					
10					
constante =			3,3	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO = Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos, são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras (intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,	$R1 = R1 / 60 =$	0,0316	cm/seg		
Para o segundo conjunto de leituras,	$R2 = R1 / 60 =$	0,0550	cm/seg		
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =		0,001933	cm/seg		
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios, interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =		0,000118	cm/seg		
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P3 - Barragem de Ipeúna (SP)		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	2	26,6	xxxxxxx	xxxxxxx
2	2	2	27,8	1,2	0,6
3	4	2	28,9	1,1	0,55
4	6	2	29,9	1,1	0,55
5	8	2	31	1,1	0,55
6					
7					
8					
9					
10					
			constante =	0,55	cm/min.
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	30	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	30,6	0,6	0,6
3	2	1	31,1	0,5	0,5
4	3	1	31,7	0,6	0,6
5	4	1	32,3	0,6	0,6
6					
7					
8					
9					
10					
			constante =	0,6	cm/min.
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO = Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos, são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras (intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		$R1 = R1 / 60 =$	0,00916	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		$R2 = R1 / 60 =$	0,0100	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
$I - K = \{ (0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1) \} =$		-0,000298	cm/seg		
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios, interno e externo X = 35,22 cm² ou					
$II - K = \{ (0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1) \} =$		-0,000018	cm/seg		
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm²					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P4 - Barragem de Ipeúna (SP)		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	6,4	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	8,6	2,2	2,2
3	2	1	11	2,4	2,4
4	3	1	13,2	2,2	2,2
5	4	1	15,1	1,9	1,9
6	5	1	17,7	2,6	2,6
7	6	1	19,7	2	2
8	7	1	21,7	2	2
9	8	1	23,7	2	2
10					
constante =			2	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	18,2	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	23	4,8	4,8
3	2	1	27,2	4,2	4,2
4	3	1	31	3,8	3,8
5	4	1	35,6	4,6	4,6
6	5	1	39,7	4,1	4,1
7	6	1	43,2	3,5	3,5
8	7	1	47,2	4	4
9	8	1	51,2	4	4
10	9	1	55,2	4	4
constante =			4	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,			R1 = R1 / 60 =	0,0333	cm/seg
Para o segundo conjunto de leituras,			R2 = R1 / 60 =	0,0666	cm/seg
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			0,003287	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			0,000201	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local :		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	16,6	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	16	1,4	1,4
3	2	1	17,1	1,1	1,1
4	3	1	18,4	1,3	1,3
5	4	1	19,5	1,1	1,1
6	5	1	20,6	1,1	1,1
7	6	1	21,9	1,3	1,3
8	7	1	23,2	1,3	1,3
9	8	1	24,5	1,3	1,3
10					
constante =			1,3	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	14,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	16	1,5	1,5
3	2	1	17,5	1,5	1,5
4	3	1	19	1,5	1,5
5	4	1	20,5	1,5	1,5
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			1,5	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		R1 = R1 / 60 =	0,0216	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		R2 = R1 / 60 =	0,0250	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			-0,000498	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			-0,000030	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P6 - Barragem de Ipeúna (SP)		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	23,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	24	0,5	0,5
3	2	1	24,2	0,2	0,2
4	3	1	24,4	0,2	0,2
5	4	1	24,7	0,3	0,3
6	5	1	25	0,3	0,3
7	6	1	25,3	0,3	0,3
8	7	1	25,6	0,3	0,3
9					
10					
constante =			0,3	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	30,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	31	0,5	0,5
3	2	1	31,5	0,5	0,5
4	3	1	32	0,5	0,5
5	4	1	32,5	0,5	0,5
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			0,5	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		R1 = R1 / 60 =	0,0050	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		R2 = R1 / 60 =	0,0083	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			0,000247	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			0,000015	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P1 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	7,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	8,2	0,7	0,7
3	2	1	8,9	0,7	0,7
4	3	1	9,3	0,4	0,4
5	4	1	9,7	0,4	0,4
6	5	1	10,1	0,4	0,4
7	6	1	10,6	0,5	0,5
8	7	1	11,1	0,5	0,5
9	8	1	11,6	0,5	0,5
10					
constante =			0,5	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	19	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	20	1	1
3	2	1	21	1	1
4	3	1	21,7	0,7	0,7
5	4	1	22,5	0,8	0,8
6	5	1	23,3	0,8	0,8
7	6	1	24,1	0,8	0,8
8	7	1	25	0,9	0,9
9	8	1	25,8	0,8	0,8
10					
constante =			0,8	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,			R1 = R1 / 60 =	0,0083	cm/seg
Para o segundo conjunto de leituras,			R2 = R1 / 60 =	0,0133	cm/seg
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			0,000341	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2 ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			0,000020	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P2 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	7,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	8,1	0,6	0,6
3	2	1	8,7	0,6	0,6
4	3	1	9,2	0,5	0,5
5	4	1	9,9	0,7	0,7
6	5	1	10,4	0,5	0,5
7	6	1	10,9	0,5	0,5
8	7	1	11,4	0,5	0,5
9					
10					
constante =			0,5	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	19	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	20,5	1,5	1,5
3	2	1	22	1,5	1,5
4	3	1	23,5	1,5	1,5
5					
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			1,5	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO = Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos, são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras (intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		R1 = R1 / 60 =	0,0083	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		R2 = R1 / 60 =	0,0250	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = { (0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1) } =			0,002031	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios, interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = { (0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1) } =			0,000124	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P3 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	15	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	16,6	1,6	1,6
3	2	1	18,6	2	2
4	3	1	20,2	1,6	1,6
5	4	1	22	1,8	1,8
6	5	1	23,6	1,6	1,6
7	6	1	25,2	1,6	1,6
8	7	1	26,8	1,6	1,6
9					
10					
constante =			1,6	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	27	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	29,2	2,2	2,2
3	2	1	31,2	2	2
4	3	1	33,2	2	2
5	4	1	35,2	2	2
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			2	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		$R1 = R1 / 60 =$	0,0266	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		$R2 = R1 / 60 =$	0,0333	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica "in situ" k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			-0,000250	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			-0,000015	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P4 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	11	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	12,5	1,5	1,5
3	2	1	13,6	1,1	1,1
4	3	1	15	1,4	1,4
5	4	1	16,4	1,4	1,4
6	5	1	17,5	1,1	1,1
7	6	1	18,6	1,1	1,1
8	7	1	19,7	1,1	1,1
9					
10					
constante =			1,1	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	31	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	33	2	2
3	2	1	35	2	2
4	3	1	36,6	1,6	1,6
5	4	1	38,6	2	2
6	5	1	40,6	2	2
7					
8					
9					
10					
constante =			2	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		$R1 = R1 / 60 =$	0,0183	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		$R2 = R1 / 60 =$	0,0333	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica "in situ" k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =		0,001328	cm/seg		
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =		0,000081	cm/seg		
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P5 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	10,6	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	11,4	0,8	0,8
3	2	1	12,2	0,8	0,8
4	3	1	13,1	0,9	0,9
5	4	1	14	0,9	0,9
6	5	1	14,6	0,6	0,6
7	6	1	15,5	0,9	0,9
8	7	1	16,1	0,6	0,6
9	8	1	16,7	0,6	0,6
10	9	1	17,3	0,6	0,6
constante =			0,6	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	30	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	32,1	2,1	2,1
3	2	1	34,5	2,4	2,4
4	3	1	36,5	2	2
5	4	1	38,7	2,2	2,2
6	5	1	40,7	2	2
7	6	1	42,7	2	2
8	7	1	44,7	2	2
9					
10					
constante =			2	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,			R1 = R1 / 60 =	0,0100	cm/seg
Para o segundo conjunto de leituras,			R2 = R1 / 60 =	0,0333	cm/seg
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			0,002906	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			0,000177	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					

UNESP - Campus de Rio Claro					
Departamento de Geologia Aplicada					
Laboratório de Geotécnica					
ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE SOLO " IN SITU "					
PERMEÂMETRO DE GUELPH					
Classificação :			Local : P6 - Barragem de Cordeirópolis		
PRIMEIRO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H1 = 5 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	10,1	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	11,5	1,4	1,4
3	2	1	13	1,5	1,5
4	3	1	14,1	1,1	1,1
5	4	1	15,5	1,4	1,4
6	5	1	16,6	1,1	1,1
7	6	1	17,7	1,1	1,1
8	7	1	18,8	1,1	1,1
9	8	1	19,9	1,1	1,1
10					
constante =			1,1	cm/min.	
SEGUNDO CONJUNTO DE LEITURAS (P / H2 = 10 CM)					
NÚMERO DE LEITURAS	TEMPO (MINUTO)	INTERV. TEMPO (MINUTO)	NIV. D'ÁGUA (CM)	VAR.NIVEL D'ÁGUA (CM)	R1 (CM/MINUTO)
1	0	1	35,5	xxxxxxx	xxxxxxx
2	1	1	36	2,5	2,5
3	2	1	38	2	2
4	3	1	40	2	2
5	4	1	42	2	2
6					
7					
8					
9					
10					
constante =			2	cm/min.	
RESERVATÓRIO UTILIZADO: (INTERNO E EXTERNO = X) (INTERNO =Y)					
O valor de R1 e R2 expressos em segundos,são obtidos quando os valores de R1 e R2 permanecem constantes por pelo menos três leituras(intervalos de tempo) consecutivos.					
Para o primeiro conjunto de leituras,		$R1 = R1 / 60 =$	0,0183	cm/seg	
Para o segundo conjunto de leituras,		$R2 = R1 / 60 =$	0,0333	cm/seg	
O coeficiente de condutividade hidráulica " <i>in situ</i> " k pode ser obtido por uma das seguintes expressões					
I - K = {(0,0041) . (X) . (R2) - (0,0054) . (X) . (R1)} =			0,001328	cm/seg	
se tiverem sido utilizados ambos os reservatórios,interno e externo X = 35,22 cm2					
ou					
II - K = {(0,0041) . (Y) . (R2) - (0,0054) . (Y) . (R1)} =			0,000081	cm/seg	
se tiverem sido utilizado apenas o reservatório interno Y = 2,15cm2					