

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

PEDRO LEMOS CAMARERO

ANÁLISE DE INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS DE TERRA A  
PARTIR DA INTEGRAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO DA  
ELETORRESISTIVIDADE COM ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus 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

2016

551 Camarero, Pedro Lemos  
C172a Análise da integridade física de barragens de terra a partir do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos / Pedro Lemos Camarero. - Rio Claro, 2016  
97 f. : il., figs., tabs., fots., mapas

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

1. Geofísica. 2. Erosão interna. 3. Barragens. 4. eletrorresistividade. I. Título.

PEDRO LEMOS CAMARERO

ANÁLISE DE INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS DE  
TERRA A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DO MÉTODO  
GEOFÍSICO DA ELETRORRESISTIVIDADE COM  
ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Dissertação de Mestrado apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Prof. Dr. José Ricardo Melges Bortolin

Prof. Dr. João Carlos Dourado

Rio Claro, 15 de Abril de 2016.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

*Aos meus padrinhos, Mario e Lela.*

## AGRADECIMENTOS

Essa dissertação é fruto de um trabalho e pesquisa não apenas de uma ou duas cabeças pensantes. São inúmeras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o amadurecimento desse grande e longo projeto. Seria injustiça da minha parte não creditar aos respectivos às devidas e merecidas honras. Por isso uso essa página para agradecer tais pessoas que fazem toda a diferença em minha vida. Mas que fique claro que apenas uma página não é suficiente para expressar toda a minha gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus e minha família. Agradeço especialmente aquele sem o qual esse projeto não teria saído do papel, meu orientador, César Augusto Moreira. Pelos inúmeros conselhos, ensinamentos e dificuldades passadas ao longo de mais uma parceria.

Agradeço a minha mãe e meu pai pelos exemplos que são. A Ligia Landell, obrigado só por tudo. Aos meus irmãos Eduardo, Zezinho e Renata. Aos respectivos irmãos herdados Fernanda, Livia e Toi. Ao meu afilhado Felipe e seus inúmeros ensinamentos que um pequeno grande homem de apenas 4 anos pode proporcionar. Aos meus sobrinhos Maria Clara, João, Raul, Luiza e Maria (Bahia). Ao meu querido Vô Zé sempre atencioso e disposto. E aos respectivos Vô Chico, Vô Dora e Vô Ligia, que mesmo longe continuam sempre presentes. A minha Madrinha, Lela e ao meu padrinho Marião. Por toda ajuda, apoio e paciência. E claro, por terem me adotado por 7 meses. A Dora e André pela convivência (e paciência). Ao Marcelinho Carioca pela parceria. Aos meus irmãos Lacerda e Carol por todo companheirismo e pelos 15 anos de amizade. Agradeço a família Landell por todo suporte e apoio. Aos meus queridos tios Diniz, Marta, Sânia, Gui, Paulo, Helô, Tia Tê, Fernando, Graça. A Selma e a André por terem me acolhido durante minha estadia em Nova Friburgo.

Agradeço a empresa Núcleo de Projetos e Consultoria que apostou em mim. Agradeço a todos meus parceiros de trabalho Magali, Luiz, Rogério, Murilo, Rodrigo, Alaor, Diogo, Moacir, Ricardo, Danilo, Ana, Fábio, Saulo, Marcio, Luciano, Mario César. Agradeço ao geólogo Marcelo Denser Monteiro pelas longas conversas geológicas nos túneis da linha 5.

Agradeço especialmente a equipe que me acolheu e que tanto me ajudou e ensinou: Eduardo Augusto Fecho, Alexandre de Paula Sá, Mario Alberto Barbosa Amarante, André Carvalho e a Cesário Garcia.

Agradeço a Unesp por todo apoio e estrutura fornecida. Agradeço especialmente a ajuda do técnico Alan na elaboração dos ensaios geotécnicos e suporte na obtenção de dados geotécnicos. Agradeço aos colegas de faculdade que me apoiaram nessa jornada. Agradeço a Daniel Kenzi pelo suporte em campo e ao meu grande irmão de faculdade Luís Henrique Aquaroli Souza. Agradeço aos professores Malagutti, Dourado, Braga, Marcus (Marcão), José Ricardo Bortolin e aos funcionários da Unesp.

## RESUMO

Barragens são estruturas que represam rios e córregos para diversas finalidades. Essas estruturas, geralmente precisam ser robustas para suportar a força do represamento e os altos valores de carga de água acumulados. A constante manutenção dessas estruturas é imprescindível, uma vez que um acidente eventual pode gerar danos de proporções catastróficas. Esse estudo apresenta uma alternativa barata, de simples e rápida aplicação para investigação de zonas de percolação de água em barragens de terra, construídas com material de empréstimo distintos. Os métodos de investigação utilizados foram: ensaios geotécnicos como análise granulométrica, determinação dos índices físicos do solo, ensaio de permeabilidade com o permeâmetro de Guelph e, o método geofísico da eletrorresistividade, a partir da técnica do imageamento elétrico. Em cada barragem, foram adquiridas três linhas geofísicas paralelas ao eixo longitudinal da barragem. O espaçamento entre eletrodos foi de 2m e o arranjo utilizado no estudo foi o Wenner. Os resultados são apresentados a partir de imagens geofísicas 2D e 3D com valores de resistividade elétrica medida e modelada, onde foi possível identificar zonas de baixos valores relativos de resistividade elétrica, interpretadas como zonas saturadas e de provável infiltração no corpo da barragem. Os dados quantitativos dos ensaios geotécnicos contribuem para maior entendimento do fluxo hídrico interno.

**Palavras-Chave:** erosão interna. geofísica. barragens. eletrorresistividade.

## ABSTRACT

Dams are structures that dam rivers and streams for a variety of purposes. These structures, often need to be sturdy to withstand the force of the impoundment and the high values of accumulated water load. The constant maintenance of these structures is essential, since a possible accident can lead to damage of catastrophic proportions. This study presents an inexpensive alternative, simple and quick application for investigation of seepage of water in Earth dams, built with distinct loan material. The research methods used were: geotechnical tests as granulometric analysis, determination of the physical indexes of soil, permeability test with permeameter of Guelph and the geophysical method of electric resistivity, from electrical resistivity tomography. At each dam, were acquired three geophysical lines parallel to the longitudinal axis of the dam. The spacing between electrodes was 2m and the array used in the study was Wenner. The results are presented from geophysical images with 2D and 3D electrical resistivity values measured and modeled, where it was possible to identify areas of low relative values of electrical resistivity, interpreted as saturated areas and likely infiltration of the body of the dam. The quantitative data of the Geotechnical testing contribute to greater understanding of the internal water flow.

**Keywords:** internal erosion. geophysics. dams. electrical resistivity.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1:</b> Localização das áreas de estudo. ....                                                                                                                                  | 17 |
| <b>Figura 2.2:</b> Bloco de basalto em processo de alteração no entorno da barragem de Cordeirópolis .....                                                                                | 20 |
| <b>Figura 2.3:</b> Afloramento de encosta do Grupo Itararé ao lado da barragem de estudos em Ipeúna .....                                                                                 | 20 |
| <b>Figura 3.1:</b> Salto das Sete Quedas antes (a) e após a elevação do nível d'água (b).....                                                                                             | 22 |
| <b>Figura 3.2:</b> Barramentos de terra usuais: a) Barragem de terra homogênea; b) Barragem de terra zonada com núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo ..... | 24 |
| <b>Figura 3.3:</b> Barragem de enrocamento de montante .....                                                                                                                              | 26 |
| <b>Figura 3.4:</b> Mecanismo de formação de <i>piping</i> a partir da erosão regressiva, jusante para montante .....                                                                      | 28 |
| <b>Figura 3.5:</b> Processo de formação de <i>piping</i> por meio do alargamento das paredes das trincas.....                                                                             | 29 |
| <b>Figura 4.1:</b> Propagação de corrente elétrica através de meio com dimensões conhecidas ....                                                                                          | 32 |
| <b>Figura 4.2:</b> Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos .....                                                              | 33 |
| <b>Figura 4.3:</b> Esquema dos arranjos Wenner.....                                                                                                                                       | 36 |
| <b>Figura 4.4:</b> Arranjo Wenner e o espaçamento constante entre eletrodos .....                                                                                                         | 37 |
| <b>Figura 4.5:</b> Volumes e massas das três fases físicas do solo.....                                                                                                                   | 38 |
| <b>Figura 4.6:</b> Esquema do arranjo experimental utilizado por Henry Darcy .....                                                                                                        | 46 |
| <b>Figura 4.7:</b> Valores de permeabilidade em função da granulometria .....                                                                                                             | 47 |
| <b>Figura 4.8:</b> Caixa do equipamento – permeâmetro de Guelph.....                                                                                                                      | 50 |
| <b>Figura 4.9:</b> Esquema do permeâmetro de Guelph .....                                                                                                                                 | 51 |

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 5.1:</b> Localização das seções geofísicas na barragem de Cordeirópolis – SP .....                                                                                         | 53 |
| <b>Figura 5.2:</b> Esquema das linhas geofísicas na área de estudos de Cordeirópolis – SP .....                                                                                      | 54 |
| <b>Figura 5.3:</b> Localização das linhas Geofísicas na barragem de Ipeúna – SP .....                                                                                                | 54 |
| <b>Figura 5.4:</b> Esquema das linhas geofísicas na área de estudos de Ipeúna – SP .....                                                                                             | 55 |
| <b>Figura 5.5:</b> Resistivímetro ABEM Terrameter LS em operação.....                                                                                                                | 56 |
| <b>Figura 5.6:</b> Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Ipeúna..                                                                                      | 57 |
| <b>Figura 5.7:</b> Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Cordeirópolis .....                                                                           | 57 |
| <b>Figura 6.1:</b> Esquema da disposição das linhas geofísicas em corte transversal a barragem ...                                                                                   | 59 |
| <b>Figura 6.2:</b> Linhas de imageamento elétrico 1, 2 e 3 – Cordeirópolis .....                                                                                                     | 60 |
| <b>Figura 6.3:</b> Modelo de visualização 3D em blocos com as resistividades medida (a) e resistividade modelada (b), com posicionamento dos pontos de ensaio de permeabilidade....  | 61 |
| <b>Figura 6.4:</b> Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (0 a 4m).....                                                            | 62 |
| <b>Figura 6.5:</b> Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (5 a 10m).....                                                           | 63 |
| <b>Figura 6.6:</b> Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (0 a 4m).....                                                          | 64 |
| <b>Figura 6.7:</b> Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (6 a 10m).....                                                         | 65 |
| <b>Figura 6.8:</b> Curva granulométrica da amostra de solo de Cordeirópolis – SP .....                                                                                               | 67 |
| <b>Figura 6.9:</b> Esquema da disposição das linhas geofísicas em corte transversal a barragem ...                                                                                   | 68 |
| <b>Figura 6.10:</b> Linhas de imageamento elétrico 1, 2 e 3 – Ipeúna .....                                                                                                           | 70 |
| <b>Figura 6.11:</b> Modelo de visualização 3D em blocos com as resistividades medida (a) e resistividade modelada (b), com posicionamento dos pontos de ensaio de permeabilidade.... | 71 |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 6.12:</b> Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Ipeúna separados por níveis (0 a 4m).....    | 72 |
| <b>Figura 6.13:</b> Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Ipeúna separados por níveis (5 a 10m).....   | 73 |
| <b>Figura 6.14:</b> Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Ipeúna separados por níveis (0 a 4m).....  | 74 |
| <b>Figura 6.15:</b> Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Ipeúna separados por níveis (5 a 10m)..... | 75 |
| <b>Figura 6.16:</b> Curva granulométrica da amostra de solo de Ipeúna.....                                             | 77 |
| <b>Figura 7.1:</b> Fragmentos de rochas alterada via trado manual.....                                                 | 78 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 4.1:</b> Resumo e definição dos índices físicos do solo .....                                                         | 39 |
| <b>Tabela 4.2:</b> Valores da Massa específica da água $\rho_w$ em diferentes temperaturas .....                                | 42 |
| <b>Tabela 4.3:</b> Influência da fração que passa na peneira 100 na permeabilidade de filtros de agregado lavado .....          | 49 |
| <b>Tabela 6.1:</b> Síntese dos resultados de permeabilidade da barragem de Cordeirópolis a partir do permeâmetro de Guelph..... | 66 |
| <b>Tabela 6.2:</b> Síntese dos resultados dos índices físicos para amostra de solo da barragem de Cordeirópolis – SP.....       | 66 |
| <b>Tabela 6.3:</b> Síntese dos resultados de permeabilidade da barragem de Ipeúna a partir do permeâmetro de Guelph.....        | 76 |
| <b>Tabela 6.4:</b> Síntese dos resultados dos índices físicos para amostra de solo da barragem de Ipeúna – SP.....              | 76 |
| <b>Tabela 7.1:</b> Comparativo entre os resultados dos índices físicos das duas barragens .....                                 | 82 |

## SUMÁRIO

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>                                         | <b>14</b> |
| <b>1.1 – Objetivos.....</b>                                         | <b>16</b> |
| <b>1.2 – Organização do trabalho.....</b>                           | <b>16</b> |
| <b>2 – ÁREA DE ESTUDO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS .....</b>            | <b>17</b> |
| <b>2.1 – Geologia Regional.....</b>                                 | <b>18</b> |
| <b>2.2 – Unidades litoestratigráficas relevantes ao estudo.....</b> | <b>18</b> |
| <b>2.2.1 – Grupo Itararé.....</b>                                   | <b>18</b> |
| <b>2.2.2 – Formação Serra Geral.....</b>                            | <b>19</b> |
| <b>2.3 – Geologia local .....</b>                                   | <b>19</b> |
| <b>3 – BARRAGENS – REVISÃO TÉCNICA .....</b>                        | <b>21</b> |
| <b>3.1 - Barragens de regularização.....</b>                        | <b>21</b> |
| <b>3.2 – Barragens de contenção .....</b>                           | <b>22</b> |
| <b>3.3 – Tipos de barragens .....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>3.3.1 - Barragens de terra.....</b>                              | <b>23</b> |
| <b>3.3.2 – Barragens de concreto.....</b>                           | <b>25</b> |
| <b>3.3.3 – Barragens de enrocamento.....</b>                        | <b>25</b> |
| <b>3.4 - Problemas associados a barragens.....</b>                  | <b>26</b> |
| <b>4 – METODOLOGIA EMPREGADA .....</b>                              | <b>32</b> |
| <b>4.1 - Estudos Geofísicos Aplicados em Barragens .....</b>        | <b>30</b> |
| <b>4.2 – Geofísica – Métodos Geoelétricos.....</b>                  | <b>31</b> |
| <b>4.2.1 – Resistência e Resistividade.....</b>                     | <b>31</b> |

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.2.2 – Eletrorresistividade .....</b>                                                   | <b>33</b> |
| <b>4.2.3 – Fatores que influenciam os resultados da eletrorresistividade .....</b>          | <b>35</b> |
| <b>4.2.4 – Técnicas e arranjos geoeletricos .....</b>                                       | <b>36</b> |
| <b>4.3 – Ensaios Geotécnicos.....</b>                                                       | <b>38</b> |
| <b>4.3.1- Índices físicos do solo.....</b>                                                  | <b>38</b> |
| <i>4.3.1.1 - Massa especifica do solo (<math>\rho</math>) .....</i>                         | <i>39</i> |
| <i>4.3.1.2 - Teor de umidade (<math>w</math>) .....</i>                                     | <i>40</i> |
| <i>4.3.1.3 – Massa especifica seca (<math>\rho_d</math>).....</i>                           | <i>41</i> |
| <i>4.3.1.4 – Índice de vazios (<math>e</math>).....</i>                                     | <i>41</i> |
| <i>4.3.1.5 – Porosidade (<math>n</math>).....</i>                                           | <i>41</i> |
| <i>4.3.1.6 – Grau de Saturação (<math>S_r</math>) .....</i>                                 | <i>42</i> |
| <i>4.3.1.7 – Massa especifica da água (<math>\rho_w</math>).....</i>                        | <i>42</i> |
| <i>4.3.1.8 – Massa Especifica dos Sólidos (<math>\rho_s</math>).....</i>                    | <i>42</i> |
| <b>4.3.2 – Análise granulométrica .....</b>                                                 | <b>43</b> |
| <b>4.3.3 – Permeabilidade .....</b>                                                         | <b>45</b> |
| <i>4.3.3.1 - Coeficiente de permeabilidade (<math>k</math>) .....</i>                       | <i>45</i> |
| <i>4.3.3.2 - Fatores que influenciam <math>k</math> e seus intervalos de variação .....</i> | <i>48</i> |
| <i>4.3.3.2.1 - Estratificação e estruturas do solo.....</i>                                 | <i>48</i> |
| <i>4.3.3.2.2 – Granulometria e amplitude de variação granulométrica.....</i>                | <i>48</i> |
| <i>4.3.3.2.3 – Mineralogia .....</i>                                                        | <i>49</i> |
| <i>4.3.3.2.4 – Índice de vazios (<math>e</math>).....</i>                                   | <i>49</i> |
| <i>4.3.3.2.5 – Temperatura .....</i>                                                        | <i>49</i> |
| <i>4.3.3.2.6 – Grau de saturação (<math>S_r</math>).....</i>                                | <i>50</i> |

|                                                                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>4.3.3.3 – Permeâmetro de Guelph</i> .....                                                                                           | 50        |
| <i>4.3.3.4 – Cálculo da permeabilidade</i> .....                                                                                       | 52        |
| <b>5 – AQUISIÇÕES DE DADOS</b> .....                                                                                                   | <b>53</b> |
| <b>5.1 – Dados geoeletricos</b> .....                                                                                                  | <b>53</b> |
| <b>5.2 – Dados geotécnicos</b> .....                                                                                                   | <b>56</b> |
| <b>6 – RESULTADOS</b> .....                                                                                                            | <b>58</b> |
| <b>6.1 – Barragem de Cordeirópolis</b> .....                                                                                           | <b>58</b> |
| <i>6.1.1 – Resultados geoeletricos</i> .....                                                                                           | 58        |
| <i>6.1.2 – Resultados dos ensaios Geotécnicos – Barragem de Cordeirópolis</i> .....                                                    | 66        |
| <b>6.2 – Barragem de Ipeúna</b> .....                                                                                                  | <b>68</b> |
| <i>6.2.1 – Resultados geoeletricos</i> .....                                                                                           | 68        |
| <i>6.2.2 – Resultados dos ensaios Geotécnicos – Barragem de Ipeúna</i> .....                                                           | 76        |
| <b>7 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....                                                                                | <b>78</b> |
| <b>7.1 – Barragem de Cordeirópolis</b> .....                                                                                           | <b>78</b> |
| <b>7.2 – Barragem de Ipeúna</b> .....                                                                                                  | <b>80</b> |
| <b>7.3 – Comparativo entre resultados das barragens de Cordeirópolis e Ipeúna</b> .....                                                | <b>81</b> |
| <b>8 – CONCLUSÕES</b> .....                                                                                                            | <b>83</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                                                                               | <b>85</b> |
| <b>ANEXO A – PLANILHA COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS</b> .....                                                          | <b>89</b> |
| <b>ANEXO B – IMAGENS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO COM PSEUDO-SEÇÃO, SEÇÃO CALCULADA E SEÇÃO MODELADA – BARRAGEM DE CORDEIRÓPOLIS</b> ..... | <b>92</b> |
| <b>ANEXO C – IMAGENS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO COM PSEUDO-SEÇÃO, SEÇÃO CALCULADA E SEÇÃO MODELADA – BARRAGEM DE IPEÚNA</b> .....        | <b>95</b> |

## 1 – INTRODUÇÃO

Barragem pode ser entendida como uma estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue com a finalidade de represamento e elevação do nível d'água, para a formação de um reservatório de água. Esse reservatório pode ser destinado a diversas finalidades: ao controle de cheias, irrigação, geração de energia, navegação, à regularização de vazão, abastecimento urbano e industrial, piscicultura, recreação, turismo, rejeitos industriais, dentre outros objetivos. As barragens tiveram um papel fundamental no desenvolvimento das civilizações. A sua construção era motivada, sobretudo, pela escassez de água no período seco e pela consequente necessidade de armazenamento de água, realizado por barragens executadas em bases empíricas (SOUZA, 2013).

Barragens de terra com estocagem de água para irrigação são usadas desde os primórdios da civilização, como atestam a história clássica e o que restou de estruturas de antigas edificações. Algumas dessas estruturas já possuíam tamanho notável, como uma antiga barragem de terra em Sri Lanka, construída em 504 a.C. a qual possui 13 milhões de metros cúbicos de material aterrado. Como no passado, hoje em dia as barragens de terra são o tipo mais comum de pequenos barramentos, devido à utilização de materiais em seu estado natural com o mínimo de processamento (CULLEN, 1964).

Infelizmente problemas com barragens são frequentes. O desenvolvimento tecnológico proporcionou melhorias ao longo do tempo, mas ainda há relatos de problemas associados a barragens. Entre 2000 e 2009 foram relatados 140 incidentes apenas no Brasil (PERINI, 2009). Uma grande parte desses incidentes é associada a problemas de infiltração e erosão interna (*piping*).

No dia 5 de Novembro de 2015 aconteceu um acidente na barragem de rejeitos da mineradora Samarco no município de Bento Rodrigues – MG. Uma das três barragens da empresa se rompeu enquanto passava por obras de alteamento. De acordo com o IBAMA, houve extravasamento de pelo menos 34 milhões de metros cúbicos de rejeito de mineração. Os principais danos causados pelo acidente foram mais de 20 vítimas fatais, severos danos materiais a comunidade local, e ambientalmente o episódio é avaliado como o maior desastre ambiental do país, já que o rejeito causou um extermínio de grande parte da fauna do Rio Doce e chegou até o litoral do Espírito Santo, prejudicando inclusive todo o bioma local (IBAMA, 2015).

As construções de pequenas e médias barragens de terra, em muitos casos não contam com projetos técnicos baseados em dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais e de campo, ou mesmo na análise criteriosa da estabilidade do barramento.

A maior parte das pesquisas geotécnicas é dirigida para as barragens de grande porte. Assim, para a formulação de projeto para as barragens de pequeno porte, são utilizadas apenas orientações provenientes de manuais técnicos, apostilas didáticas e recomendações empíricas (PASCHOALIN FILHO, 2002).

O presente estudo tem como tema a aplicação de métodos geofísicos elétricos para investigações no interior de corpos de barragens de terra de pequeno porte, com a finalidade de identificar zonas de percolação de água, complementado por ensaios geotécnicos.

A geofísica é uma área das geociências alicerçada no estudo de propriedades físicas intrínsecas aos materiais terrestres, cujas variações podem ser condicionadas a diversos fatores. No caso dos métodos Elétricos e Eletromagnéticos, segundo McNeill (1980), Ward (1990), Telford (1990) e Nobes (1996) é possível citar os seguintes fatores: conteúdo mineral, tipos predominantes de argilominerais, tamanho de grãos, variabilidade granulométrica, porosidade, permeabilidade, presença e composição do fluido intraporo, heterogeneidades e anisotropias como fraturas e falhas.

A geofísica pode ser uma alternativa interessante para investigações preliminares e ao monitoramento de infiltrações em barragens de terra, diante do contraste de propriedades físicas entre zonas com percolação de água e os materiais íntegros ao redor. Esta ferramenta, aliada a avaliação de aspectos visíveis em superfície resultantes de processos nocivos à integridade da estrutura, como a presença de ravina ou feições de escorregamentos, pode proporcionar uma avaliação adequada, rápida e de baixo custo ao estudo de barragens de pequeno porte.

Ensaio geotécnicos como determinação da permeabilidade, análise granulométrica e determinação dos índices físicos do solo são importantes para a caracterização geotécnica. A integração de dados geofísicos e geotécnicos contribui para uma avaliação abrangente de caminhos preferenciais para percolação de água em barragens de terra.

## **1.1 – Objetivos**

O objetivo do estudo foi a aplicação a técnica de tomografia elétrica em barragens de terra para definição de eventuais zonas de infiltração de água, e o potencial de evolução do processo na formação de piping, complementado por ensaios geotécnicos.

## **1.2 – Organização do trabalho**

O trabalho é dividido em 10 capítulos. No primeiro é descrito a importância das barragens e impactos de possíveis incidentes, além das motivações da pesquisa bem como as justificativas. No segundo capítulo é apresentada a área de estudo com localização e principais acessos.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão de estudos de casos de geofísica aplicada a barragens. O capítulo quatro apresenta um breve relato sobre a geologia das áreas de estudo.

O quinto capítulo é uma revisão de barragens: principais finalidades, principais tipos de barragens, e principais problemas associados às estruturas. O sexto capítulo apresenta uma revisão da metodologia empregada no estudo. O capítulo é dividido em três partes: geofísica com aspectos sobre o método da eletrorresistividade e arranjos geofísicos; índices físicos do solo com definições dos índices e análise granulométrica; permeabilidade com definições, aspectos que influenciam os valores do ensaio e metodologia do permeâmetro de Guelph.

No sétimo capítulo são apresentados detalhes da aquisição de dados e aspectos empregados na metodologia executiva dos ensaios. No capítulo oito são apresentados e descritos os resultados obtidos nos ensaios. O nono capítulo apresenta uma discussão detalhada e possíveis interpretações dos resultados. Por fim o capítulo dez descreve as conclusões do trabalho.

## 2 – ÁREAS DE ESTUDO E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

O presente estudo contemplou duas barragens de terra no interior de São Paulo. Uma barragem de terra na zona rural do município de Ipeúna – SP e outra na zona rural do município de Cordeirópolis – SP. A cidade de Ipeúna está a 195km da cidade de São Paulo, ao passo que Cordeirópolis 160km (Figura 2.1).

**Figura 2.1:** Localização das áreas de estudo.



Fonte: Modificado de GOOGLE MAPS, 2015

As duas barragens estão localizadas na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba. A barragem de Cordeirópolis represa um afluente do Ribeirão do Tatu, que cruza a cidade de Limeira e desemboca no Rio Piracicaba. A barragem de Ipeúna represa o Córrego da Fazenda Covitinga que é um afluente do Ribeirão da Água Vermelha, que é um afluente do Rio Corumbataí que por sua vez desemboca no Rio Piracicaba.

A região faz parte do contexto geomorfológico da Depressão Periférica do Estado de São Paulo. A Depressão Periférica é localizada entre rebordos pré-Cambrianos do Planalto Atlântico a Leste, e escarpas das zonas de Cuestas do Planalto Ocidental a Oeste e Norte. A unidade é descrita em três zonas: Paranapanema, Mogi-Guaçu e Médio Tietê. A área de estudos é situada na última zona. As principais características morfológicas são comportamento interplanáltico, suavemente ondulado (SILVA,1999).

## 2.1 – Geologia Regional

A área de estudo é localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, uma imensa região sedimentar localizada na plataforma sul-americana, que abriga uma sucessão sedimentar-magmática com idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo. Territorialmente a Bacia inclui porções do Paraguai, Argentina, Uruguai e Brasil; dispostos em uma área total que ultrapassa 1,5 milhão de km<sup>2</sup>. A Bacia possui uma forma ovalada com eixo maior N-S com contornos definidos por limites erosivos, e representa o conceito de bacia intracratônica do tipo Sinéclise. Chega a apresentar espessura máxima de sete mil metros (MILANI *et al.*, 2007).

O preenchimento sedimentar é predominantemente siliciclastico com intrusão de um volumoso derrame de lavas basálticas. Esse conjunto de rochas sedimentares e vulcânicas representa a superposição de pacotes depositados em pelo menos três ambientes tectônicos, durante o tectonismo e evolução do Gondwana (ZALÁN *et al.*, 1990). As rochas aflorantes na área de estudos são de idade permo-Carbonífero a Cretáceo.

## 2.2 – Unidades litoestratigráficas relevantes ao estudo

### 2.2.1 – Grupo Itararé

Os sedimentos da unidade são de idade permo-Carbonífero caracterizados por arenitos, siltitos e diamictitos as quais refletem influências glaciais em seus diferentes ambientes (SCHNEIDER *et al.*, 1974). No estado de São Paulo é caracterizado predominantemente por arenitos de granulação variada. Segundo Pires (2001) as rochas da unidade compreendem depósitos glaciais anteriores a implantação da sedimentação marinha e sedimentos depositados durante episódio transgressivo marinho.

No estado de São Paulo o Grupo Itararé é limitado na base por contato com rochas cristalinas pré silurianas, separadas por uma superfície de erosão; e o contato superior com a Formação Tatuí ocorre de forma discordante (SOUSA, 2002).

### 2.2.2 – Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral compreende a sequência de derrames de lavas basálticas com intercalações de lentes e camadas arenosas. A Formação consiste em lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. Intercalações de arenitos finos a médios, com estratificação cruzada tangencial (idêntica à da Formação Botucatu), ocorrem principalmente na parte basal. O contato inferior com os arenitos da Formação Botucatu é discordante. Com as unidades mais antigas, o contato é marcado por discordância erosiva. O contato superior também é discordante com a Formação Bauru. A ocorrência da unidade é generalizada na Bacia do Paraná e a maior espessura registrada é de 1529m na execução de um poço próximo a cidade de Presidente Epitácio - SP (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

A Formação Serra Geral é resultado do intenso vulcanismo de fissura iniciado quando ainda ocorriam as condições desérticas de sedimentação da Formação Botucatu. Dados geocronológicos indicam a época das manifestações vulcânicas para idade Eocretáceo, há  $132 \pm 1$  milhões de anos - Ma (NARDY *et al.*, 1999). A principal forma de ocorrência da unidade na região leste do Estado de São Paulo é na forma de *sills* e diques de basaltos ou diabásios e alguns derrames. Ocorrem como preenchimento de falhas (SOUSA, 2002).

### 2.3 – Geologia local

A barragem de Cordeirópolis está localizada em zonas de afloramento da Formação Serra Geral. O material do aterro do corpo da barragem é composto por um solo laterítico argiloso, fruto da alteração das rochas básicas. Em campo foi possível identificar pequenos blocos e matações de basalto no entorno do lago da barragem (Figura 2.2). O entorno da barragem é utilizado para cultivo de cana de açúcar.

**Figura 2.2:** Bloco de basalto em processo de alteração no entorno da barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Arquivo Pessoal

A barragem de Ipeúna está localizada em fundo de vale do Córrego da Fazenda Covitinga, próximo ao contato das unidades Grupo Itararé e Formação Tatuí. O material do aterro do corpo da barragem é composto por um solo argilo-arenoso. Em campo foi possível identificar afloramentos de diamictitos arenosos correspondente ao Grupo Itararé (Figura 2.3).

**Figura 2.3:** Afloramento de encosta do Grupo Itararé ao lado da barragem de estudos em Ipeúna.



Fonte: Arquivo Pessoal

### **3– BARRAGENS – REVISÃO TÉCNICA**

Barragens são estruturas que represam uma quantidade determinada de água. Geralmente essas estruturas precisam ser robustas para compensar a força da massa de água retida. Para tanto existem diversos tipos de finalidade para represamento de água ou corpo hídrico. A definição da finalidade da barragem é o primeiro condicionante do projeto básico executivo. A partir da finalidade e das vazões máximas e mínimas dos rios represados, será dimensionada a estrutura, o tipo de barragem e características eventuais do empreendimento. A seguir são expostas algumas das finalidades mais usuais para barragens.

#### **3.1 - Barragens de regularização**

Barragens de regularização tem o objetivo de regularizar o abastecimento de água e compensar o regime pluviométrico que determinadas bacias hidrográficas venham a receber, por exemplo, regiões que possuem estações do ano bem definidas, costumam estar sujeitas a regime pluviométrico irregular, com uma estação chuvosa, e outra seca. Nesse caso, a barragem serve para regular e estocar água na estação chuvosa, e compensa assim o déficit durante a estação seca (COSTA, 2012).

De fato o principal objetivo de uma barragem é o represamento de águas. Esse represamento pode ser feito para regularização e estocamento de águas com várias finalidades, tais como: irrigação agropecuária, aproveitamento industrial, uso doméstico ou para a geração de energia hidroelétrica.

Existem diversas vantagens que um empreendimento de barragem pode proporcionar. O acúmulo das águas gera um lago artificial onde é possível o aproveitamento turístico. Nesse sentido, uma barragem pode fomentar a economia local e gerar empreendimentos imobiliários e comerciais. A regularização das águas ajuda na navegabilidade do corpo hídrico e no controle da vazão e aporte a jusante em períodos de estiagem. O aumento do nível d'água pode viabilizar a navegabilidade em trechos de corredeiras. O lago artificial também pode criar benefícios para o desenvolvimento de determinadas espécies de peixes (COSTA, 2012).

Porém as principais desvantagens dos grandes empreendimentos de barragens estão associadas a fauna e flora local. A área inundada pelos lagos dos reservatórios compromete a fauna e principalmente a flora. Esse problema é agravado principalmente em habitats naturais de espécies que estejam ameaçadas de extinção. Outra desvantagem pode ser o desaparecimento de pontos turísticos (Figura 3.1).

**Figura 3.1:** Salto das Sete Quedas antes (a) e após a elevação do nível d'água (b).



Fonte: BRACK, 2012

### 3.2 – Barragens de contenção

Barragens de contenção são caracterizadas pelo represamento temporário de determinados corpos de água. São muito utilizadas em indústrias/minerações para decantação de rejeitos de mineração ou resíduos industriais – comumente chamadas de barragens de rejeito; mas também podem ser empregadas de maneira preventiva com o objetivo de amenizar o grande aporte hídrico causado por um corpo hídrico em um evento pluviométrico extraordinário. Esse tipo de barragem visa à proteção de áreas a jusante e costumam reter

temporariamente as águas e promovem a liberação de forma gradual, onde a vazão de entrada é maior que a vazão de saída -  $Q_{\text{entrada}} > Q_{\text{saída}}$  (COSTA, 2012).

### **3.3 – Tipos de barragens**

O tipo de barragem deve ser determinado a partir de fatores como a finalidade da barragem, o material de empréstimo disponível, características geológicas e topográficas e influência do clima local.

#### **3.3.1 - Barragens de terra**

Até meados do Século XX as barragens de terra eram desenvolvidas com métodos empíricos e técnicas rudimentares, e por causa disso a literatura está repleta de relatos de problemas e falhas estruturais. Esses incidentes foram um dos fatores que contribuíram para que essas técnicas rudimentares fossem substituídas gradativamente por um tipo de engenharia específica de projetos e construções de barragens. Apesar dos novos métodos, houve pouco progresso e desenvolvimento até a década de 1930 (ARHTUR, 1973).

O rápido avanço da ciência de mecânica de solos após essa década proporcionou um grande avanço desde então. Grandes nomes da mecânica dos solos como o engenheiro austríaco Karl Von Terzaghi e Arthur Casagrande prosperaram após a década de 30. Técnicas e procedimentos desenvolvidos durante o período continuam com seus princípios básicos utilizados até hoje. Esses procedimentos incluem uma pré-investigação completa sobre as condições de fundação e materiais, aplicação de técnicas e habilidades específicas para o desenvolvimento do projeto e planejamento cuidadoso e controlado dos métodos de construção (ARHTUR, 1973).

As primeiras barragens de terra possuíam material compactado por pisoteamento de animais e/ou homens. Segundo Massad (2003) na barragem de Guarapiranga, construída por ingleses no início do Século XX a partir da técnica de aterro hidráulico, foram utilizados carneiros para a compactação do solo. A compactação mecânica só foi introduzida no final do Século XIX. Segundo o mesmo autor, somente em 1947 foi construída a primeira barragem no Brasil com o emprego de técnicas desenvolvidas por Terzaghi e Casagrande no projeto e construção.

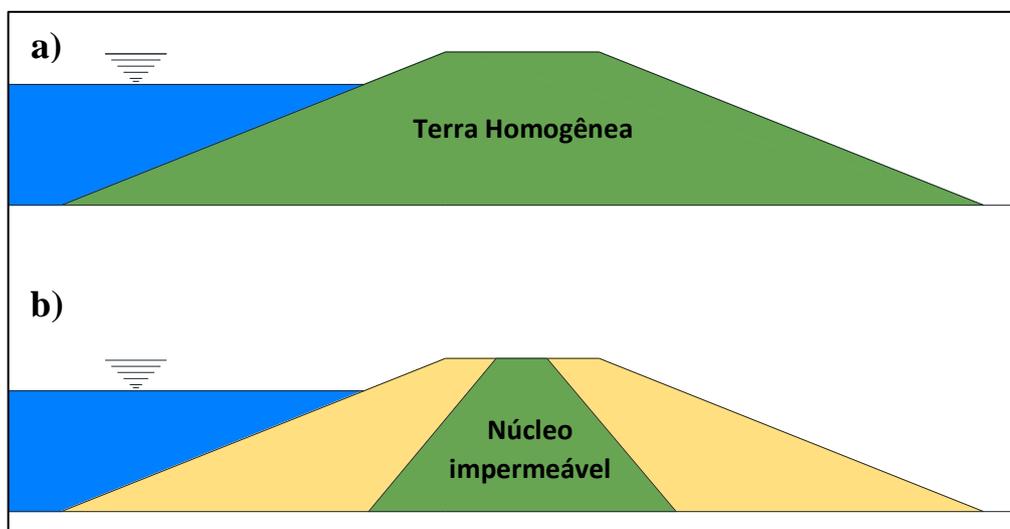
Apesar do avanço das técnicas modernas, não são todos os empreendimentos que possuem acessos às metodologias. Nesse ponto, é importante frisar que muitos

empreendimentos não conseguem arcar com o ônus de tais tecnologias. Por isso, ainda hoje são relatadas falhas estruturais, as quais não são aplicados os cuidados necessários, principalmente na execução do projeto. Métodos adequados de construção incluem ainda uma adequada preparação e colocação no corpo da barragem com controle dos testes de níveis de compactação do aterro.

O projeto de uma barragem de terra deve ser único, pois deve refletir as condições de fundação do local e a disponibilidade de materiais disponíveis para o aterro do corpo de barragem, preferencialmente próximas ao local desejado. Por isso é importante que cada projeto seja analisado separadamente, uma vez que um projeto bem sucedido em local com determinadas condições geológicas, pode não ser o ideal para condições geológicas diferentes (ARTHUR, 1973).

As barragens de terra são construídas basicamente a partir do deslocamento de um material (material de empréstimo) e a simples disposição desse material com uma acumulação e sucessiva compactação (aterro – corpo da barragem). Por uma questão de custo e logística, os materiais de empréstimo, na maioria das vezes, são utilizados do próprio sítio do reservatório ou dos arredores do empreendimento. A seguir são citados os dois tipos de barragens de terra mais usuais (Figura 3.2):

**Figura 3.2:** Barramentos de terra usuais: a) Barragem de terra homogênea; b) Barragem de terra zonada com núcleo de material com menor coeficiente de permeabilidade relativo.



Fonte: o autor.

- *Barragem Homogênea*: é o tipo de barragem onde o corpo da barragem é composto basicamente por um único material. Não há grandes contrastes de propriedades no corpo da barragem. A barragem homogênea pode conter ou não elementos drenantes como filtros internos, tapetes impermeáveis, trincheiras de vedação, entre outros;
- *Barragem Zonada*: é o tipo de barragem que possui materiais heterogêneos na composição do corpo da estrutura. É geralmente utilizado um núcleo com menores valores de permeabilidade.

### 3.3.2 – *Barragens de concreto*

São comumente empregadas em empreendimentos de grande porte. Existem basicamente três tipos principais de barragens de concreto:

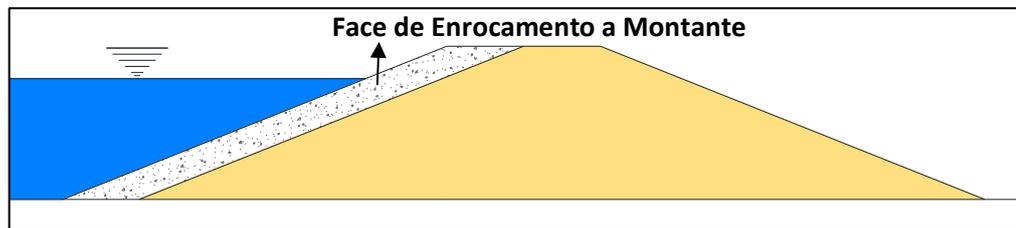
- *Barragens de concreto a gravidade*: são estruturas maciças com pouca ferragem de armação. O objetivo é que o próprio peso do concreto garanta estabilidade à estrutura e trabalhe à compressão (COSTA, 2012). Esse tipo de barragem costuma ser muito oneroso, pois pode ser consumido grande volume de concreto;
- *Barragens de concreto a gravidade aliviada*: são estruturas de concreto menos densas, menos robusta e não maciça, com vazios internos que visa menor custo executivo ou menor carga sobre as fundações. Porém é necessário um incremento de armação e ferragens para compensar os esforços de tração.
- *Barragens em arco*: são estruturas que apresentam curvatura tanto na horizontal quanto na vertical. Podem ser denominadas de estruturas de dupla curvatura e podem possuir arcos simples ou múltiplos. São muito utilizadas em vales encaixados e regiões de cânions. A estrutura trabalha a compressão e a tração, e transfere parte das pressões para a região das ombreiras (COSTA, 2012).

### 3.3.3 – *Barragens de enrocamento*

São estruturas compostas por uma ou mais faces de enrocamento – blocos de rocha/concreto, cuja finalidade é proteger a face de montante e/ou jusante de agentes intempéricos (Figura 3.3). Pode ser composto a partir de um núcleo impermeável central ou inclinado de material argiloso e separados do enrocamento por zonas de transição de

materiais, ou composta por uma face impermeável na face montante que pode ser executado por placas de metal, concreto ou asfalto.

**Figura 3.3:** Barragem de enrocamento de montante.



Fonte: o autor.

### 3.4 - Problemas associados a barragens

Barragens são estruturas que devem ser robustas e resistentes, mas como toda edificação exposta a ação de agentes intempéricos, exigem manutenção constante. Infelizmente, acidentes com essas estruturas não são raros e quase sempre geram grandes danos sociais, econômicos e ambientais. Porém, muitos acidentes podem ser evitados por meio de manutenção constante da estrutura.

Por represarem grandes quantidades de massa de água, essas estruturas necessitam de cuidados especiais, e os rompimentos totais ou parciais das mesmas geram grande potencial destrutivo, juntamente com problemas ambientais associados a rompimentos de barragens.

Os principais problemas associados a rupturas de barragens são associados a falhas de projetos – principalmente na fase de execução – e problemas operacionais e de manutenção. Alguns problemas que ocorrem na fase do projeto executivo de engenharia podem ser associadas à escolha indevida de materiais de empréstimo para o corpo de barragem, dimensionamento indevido do corpo da estrutura e de vertedouros – que podem acarretar em desestabilização da estrutura em eventos de ondas de cheia.

As falhas que ocorrem na fase de execução da obra podem ser as mais diversas, mas é possível resumir tais falhas a não conformidades ao projeto executivo, por exemplo, grau de compactação insuficiente de uma determinada camada do corpo da barragem. Entretanto muitos empreendimentos não dispõem sequer de um projeto básico de engenharia, e muitas vezes não há um responsável técnico capacitado para os devidos fins.

Grande parte das barragens brasileiras possui mais de 30 anos. Muitas não atendem a requisitos mínimos de segurança empregados atualmente. Problemas como a falta de

drenagem interna e compactação pouco eficiente são frequentes em barragens antigas (PERINI, 2009).

Outro problema frequente é a falta de manutenção do empreendimento. Muitas vezes, devido à intervenção humana, é preciso redimensionar a capacidade de vertimento das estruturas de esgotamento, porém os custos de adequação das reformas das estruturas geralmente são muito altos ou tecnicamente muito complexos. Por esse motivo, é comum as barragens brasileiras serem mantidas em operação da forma em que se encontram, e intervenções ocorrem apenas em casos emergenciais. O abandono é comum e o descomissionamento raramente é executado (PERINI, 2009).

Os principais problemas operacionais e falta de manutenção envolvem eventos como aparecimento de fissuras, galgamento da barragem, deslizamentos de talude e processos de erosão interna como *piping*. As fissuras podem estar associadas a recalques das fundações, abalos sísmicos, degradação da estrutura, entre outros. As fissuras podem evoluir para brechas. Tais discontinuidades do corpo da estrutura representam planos de fraqueza e de maior percolação de água, o que pode desencadear outros problemas de estabilidade.

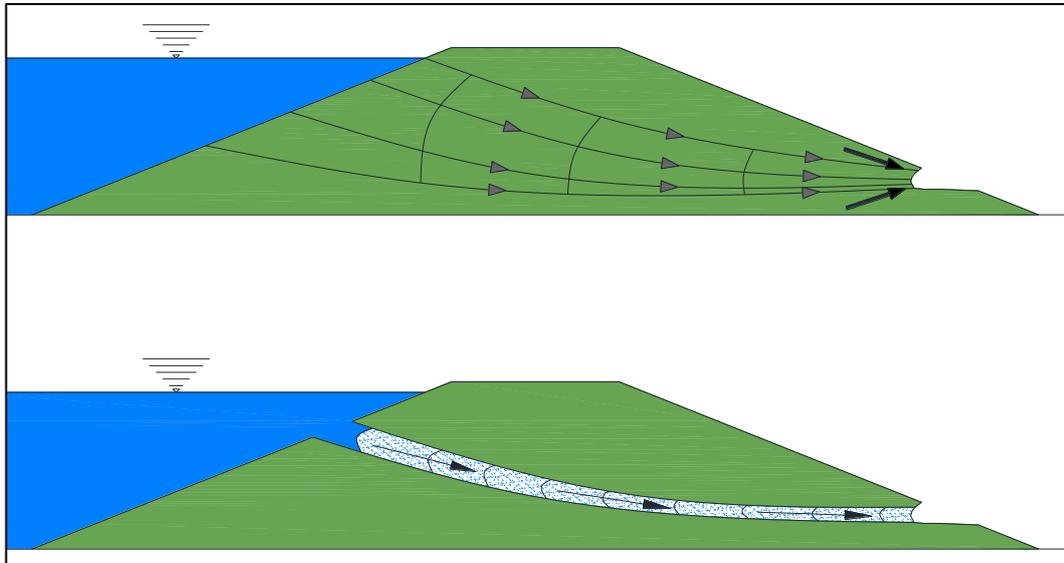
O galgamento de barragens ocorre quando há um transbordamento da barragem que pode causar danos a estrutura do corpo da barragem. O evento de galgamento costuma causar sérios danos, pois o transbordamento gera uma pressão muito grande no corpo da barragem devido a elevada massa concentrada e, geralmente é o principal motivo de rupturas de barragens. Porém, tal problema pode ser controlado com maior facilidade, por meio do controle da vazão de saída da barragem e com a construção de vertedouros maiores.

A instabilidade dos taludes ocorre quando as tensões de cisalhamento ultrapassam a resistência do material e/ou as partículas perdem coesão. Esse evento pode ser associado à percolação de água pelo corpo da barragem, que pode ocorrer de forma naturalmente, mas que pode ser agravada por fissuras, e erosão interna.

A erosão interna mais comum em barragens de terra é o fenômeno conhecido como *piping*. A forma mais comum de ocorrência de *piping* é através da erosão regressiva, onde a erosão atua de jusante para montante no corpo da barragem e forma um tubo com um canal preferencial por onde a água percola (Figura 3.4).

Segundo Massad (2003), há alguns fatores condicionantes ao *piping*: ausência de filtros e elementos drenantes internos, condições de compactação do maciço, ausência de transições adequadas entre solos e materiais granulares e presença de fundações arenosas.

**Figura 3.4:** Mecanismo de formação de *piping* a partir da erosão regressiva, jusante para montante.



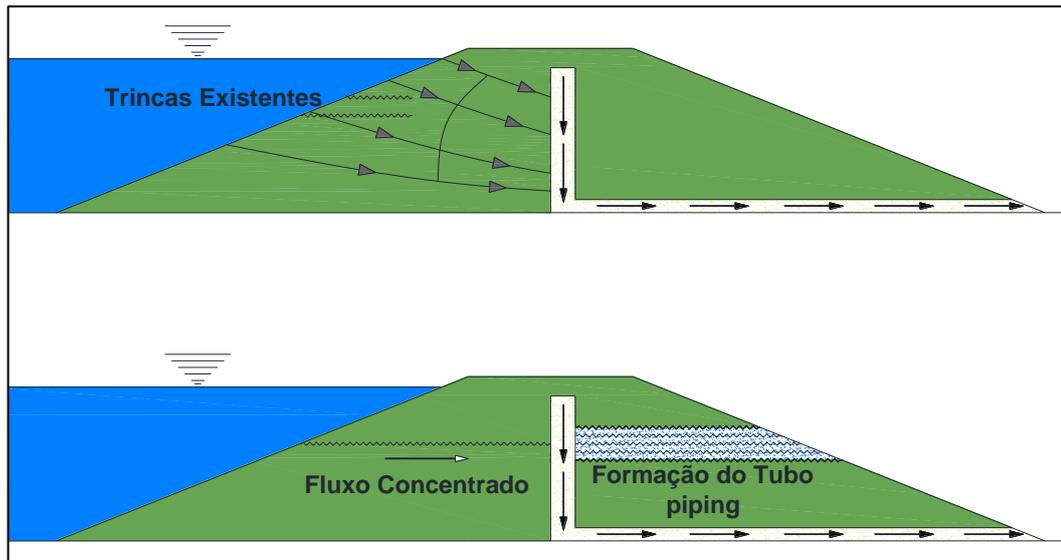
Fonte: Modificado de PERINI, 2009

Outra importante forma de ocorrência de *piping* é através de trincas existentes na barragem que permitam a formação de um fluxo concentrado. O fluxo concentrado pode causar erosão e evoluir para um tubo, que caracteriza o *piping* (Figura 3.5).

Do ponto de vista da segurança da estrutura, não é necessário que ocorra uma progressão tão acentuada do *piping*, pois bastam apenas pequenos incrementos de permeabilidade para causar o aumento de poropressão que pode resultar na perda da estabilidade (PERINI, 2009).

Existem casos famosos relatados associados à formação de *piping* em barragens. Segundo Massad (2003) a barragem de terra do reservatório de Baldwin Hills, construída em 1951 próximo a Los Angeles – EUA possuía altura média de 22 metros e dimensão entre 300 e 350m. Após 12 anos de operação houve o rompimento, que se acredita ter sido causado por *piping*, que erodiu os solos siltsos. Tudo isso após recalque das fundações que permitiram trincas na estrutura onde se iniciou o processo de erosão interna. A barragem de terra de Teton, também nos EUA, rompeu em 1976 por *piping* iniciado no contato entre solo-rocha, pois não houve o cuidado em executar a transição de materiais entre solo e a rocha fraturada.

**Figura 3.5:** Processo de formação de *piping* por meio do alargamento das paredes das trincas.



Fonte: Modificado de PERINI, 2009

## 4 – METODOLOGIA EMPREGADA

### 4.1 - Estudos Geofísicos Aplicados em Barragens

Alguns estudos de métodos geoeletricos empregados em barragens demonstram grande eficiência e os resultados apresentados até o momento são considerados satisfatórios pelos autores, como no município de Tambaú – SP, onde Malagutti Filho *et al* (1999) utilizaram a combinação dos métodos da eletrorresistividade e refração sísmica. O objetivo era efetuar o zoneamento geofísico do perfil de alteração, para caracterização de solos e rochas do sítio de uma pequena barragem, uma vez que no mesmo local existia uma barragem que foi rompida por ser construída em uma zona de fraturamentos, que gerou instabilidade na estrutura. Com o emprego da técnica do caminhamento elétrico, do arranjo dipolo-dipolo, e com um espaçamento entre eletrodos de 10m, os autores executaram uma linha geofísica de 110m com resolução de 30m de profundidade de investigação. Os resultados foram satisfatórios segundo os autores, que conseguiram determinar o topo rochoso com precisão a partir do método da sísmica de refração e, com a eletrorresistividade foi possível caracterizar a zona de fraturamento do maciço.

Na barragem de Afamia B na Síria. O estudo de Al-Fares (2011) apresenta cinco linhas geofísicas, com três linhas dispostas paralelamente ao corpo da barragem e outras duas linhas perpendiculares ao corpo da barragem. Com os dados do estudo, foi possível determinar diferentes litologias de material de empréstimo do corpo da barragem bem como zonas de percolação de água influenciadas pela tectônica regional e a geologia estrutural local, e até mesmo antigos canais de água desativados de civilizações remotas que povoaram a região no passado.

Na barragem Hidden em Raymond – Califórnia, Minsley *et al* (2011) utilizaram os métodos do potencial espontâneo e eletrorresistividade com a configuração do arranjo Schlumberger para investigação de zonas de infiltrações no corpo da barragem de terra, mudanças litológicas e a determinação do topo rochoso. Os autores consideraram os dados geofísicos satisfatórios para identificação de infiltrações no corpo da barragem.

Na barragem Mathis Creek na Califórnia, Bedrosian *et al* (2012) fizeram uma investigação com a combinação de diversos métodos geofísicos, como eletrorresistividade, magnetometria, sísmica e mapeamento aéreo por Lidar. Com o processamento dos dados foi possível identificar feições de geologia estrutural regional e, a partir de ensaios realizados em

campo identificar zonas de contato de unidades litológicas entre depósitos aluvionares, derrames vulcânicos e ainda percolação de água no contato das unidades.

A partir da técnica de caminhamento elétrico, Case (2012) utilizou o método da eletrorresistividade para monitorar duas pequenas barragens de terra em Stillwater - Oklahoma, nos Estados Unidos. Para a escolha do arranjo o autor fez alguns testes com os arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo, e optou por utilizar o último arranjo para realizar o estudo. O trabalho contemplou o monitoramento de duas barragens de terra antes, durante e após o reservatório estar devidamente preenchido de água. Os resultados apresentados para identificação de zonas susceptíveis as infiltrações foram consideradas satisfatórios pelo autor, uma vez que zonas de baixa resistividade apresentam grande contraste com o corpo da barragem. O monitoramento ao longo de um ano também apresentou diferentes resultados para a sazonalidade e influência do clima ao longo de diferentes estações do ano. O período com menos chuvas é o verão, quando as temperaturas são mais altas e tendem a secar o solo da barragem, o que favorece a formação de trincas no corpo da barragem.

## **4.2 – Geofísica – Métodos Geométricos**

A geofísica é uma área da ciência que basicamente busca atingir objetivos diversos através do contraste entre propriedades físicas de materiais. Existem diversos métodos desenvolvidos ao longo dos anos para investigação e comparação de contrastes de propriedades físicas. A adequação dos métodos é realizada para diferentes propósitos e objetivos. No presente estudo foi empregado o método da eletrorresistividade, que busca o contraste entre valores de resistividade de possíveis zonas mais saturadas com zonas menos saturadas, onde pudessem ocorrer falhas na estrutura da barragem caracterizadas por fluxo hídrico.

### **4.2.1 – Resistência e Resistividade**

Ao aplicar uma mesma corrente elétrica nas extremidades de diferentes materiais condutores, os valores de corrente elétrica serão diferentes. Essa diferença é caracterizada pela resistência do material. A resistência é caracterizada pela dificuldade da corrente fluir pelo condutor, no caso, a resistência à corrente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

Após inúmeros experimentos, o físico alemão Ohm concluiu que a corrente que atravessa um dispositivo é sempre diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada ao dispositivo. A relação matemática que expressa tal afirmação é apresentada pela equação 4.1:

$$V = R \cdot i \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

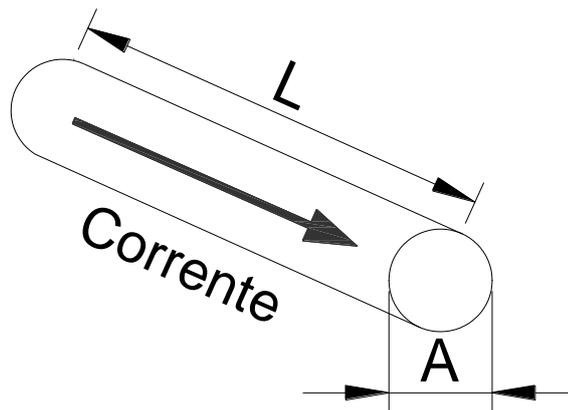
V = representa a diferença de potencial com unidade de medida expressa em Volts (V);

R = representa a resistência elétrica com unidade de medida expressa em Ohms ( $\Omega$ );

i = representa a corrente elétrica com unidade de medida expressa em Ampere (A).

A resistência elétrica de um material depende tanto do material como também de sua forma geométrica. A propriedade que determina a habilidade dos materiais em transmitir corrente elétrica é definida como resistividade elétrica ( $\rho$ ) (Figura 4.1). Expressa matematicamente pela equação 4.2:

**Figura 4.1:** Propagação de corrente elétrica através de meio com dimensões conhecidas.



Fonte: modificado de HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

R = representa a resistência elétrica com unidade de medida expressa em Ohms ( $\Omega$ );

L = representa o comprimento do material com unidade de medida expressa em metros (m);

A = representa a área da seção do material com unidade de medida expressa em metros quadrados (m<sup>2</sup>);

$\rho$  = representa a resistividade com unidade de medida expressa em ohm.m.

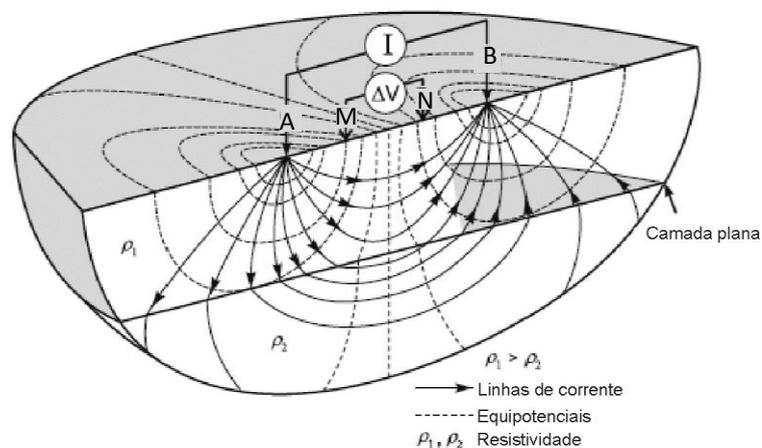
A equação 2 também pode ser expressa pela equação 4.3:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

#### 4.2.2 – Eletroresistividade

No método da eletroresistividade, correntes elétricas contínuas ou de frequência muito baixas, artificialmente geradas são introduzidas no solo por intermédio de um par de eletrodos denominados de A e B, e as diferenças de potencial resultante são medidas na superfície por meio de outro par de eletrodos, denominados M e N na área de influência do campo elétrico (Figura 4.2). Os desvios do padrão de diferenças de potencial esperado do solo homogêneo fornecem informações sobre a forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades de superfície (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

**Figura 4.2:** Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos.



Fonte: Modificado de KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007

Na terra a corrente elétrica não flui somente por um único caminho. Ao introduzir uma corrente elétrica na terra a partir de uma fonte posicionada na superfície do terreno, a corrente

irá fluir apenas no semi-espaço inferior. A variação da voltagem no meio-espaço é representada pela equação 4.4:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde:

V = representa o potencial elétrico (V);

I = representa a corrente elétrica (A);

r = representa a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial é medido (m).

A equação 4.4 representa uma relação fundamental para o método da eletrorresistividade com medidas realizadas a partir da superfície do terreno. Essa expressão é válida para meios homogêneos. Porém a Terra é um meio heterogêneo e a resistividade obtida pela equação 4.4 é denominada de resistividade aparente (GANDOLFO, 2007). Em campo é medido a diferença de potencial entre os eletrodos M e N, dada pela equação 4.5:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Ou

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (\text{Eq. 4.6})$$

A resistividade pode ser expressa pela equação 4.7:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

A partir da equação 4.7, é possível estabelecer uma relação com o fator geométrico K dado pela equação 4.8:

$$K = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Portanto, a partir da intensidade de corrente que percorre o subsolo ( $I$ ), a geometria da disposição dos eletrodos ( $K$ ) e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) medido pelos eletrodos receptores, é possível calcular o valor da resistividade aparente ( $\rho$ ) (Equação 4.9).

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

A unidade da resistividade aparente é o ohm.m ( $\Omega.m$ ) a diferença de potencial é medida em milivolt (mV), a intensidade de corrente é medida em miliampère (mA) e o coeficiente geométrico  $K$  em metros. A profundidade de investigação é proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

A propagação da corrente elétrica no meio ocorre através de dois mecanismos: condução eletrônica através da matriz da rocha e condução iônica ou eletrolítica através de íons existentes de fluídos contidos nos poros e descontinuidades do meio (GANDOLFO, 2007). A condução eletrolítica é a mais importante no emprego do método da eletrorresistividade, pois os minerais em geral não são bons condutores de corrente elétrica, exceção feita para alguns metais nativos e outras classes de minerais metálicos. Nessa condição, a condutividade de solos e rochas ocorre preferencialmente de forma eletrolítica a partir de íons em solução presentes na água do meio.

#### ***4.2.3 – Fatores que influenciam os resultados da eletrorresistividade***

Existem fatores geológicos que influenciam diretamente o método de eletrorresistividade. A propagação elétrica em solos e rochas, em geral, é disseminada por poros e/ou interstícios da matriz rochosa. Os principais fatores geológicos são a mineralogia e a própria natureza do material, a porosidade da rocha/solo e o grau de saturação da rocha/solo, uma vez que a água contribui na condutividade da corrente elétrica (MCNEILL, 1980).

A topografia também pode influenciar os levantamentos elétricos, uma vez que as linhas de fluxo de corrente tendem a acompanhar a superfície do terreno. As superfícies equipotenciais são, assim, distorcidas, e podem resultar em leituras anômalas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009). As interpretações de eletrorresistividade apresentam interpretações ambíguas onde é necessário fazer interpretações geofísicas e geológicas, além de limitações

tais como método restrito a padrões estruturais mais simples, apresenta resultados não confiáveis quando para estruturas complexas, e a profundidade de penetração do método é limitada pela energia elétrica máxima que pode ser introduzida no solo.

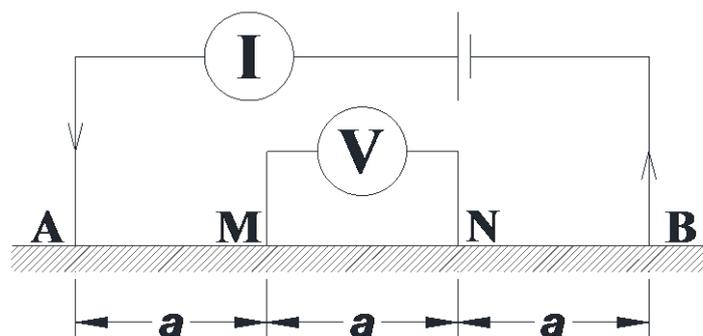
#### 6.2.4 – Técnicas e arranjos geoeletricos

Para a aquisição dos dados de campo do método da eletrorresistividade existem diversas técnicas. Entre as técnicas mais comuns, as mais empregadas são Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Imageamento Elétrico. A primeira investiga predominantemente a variação vertical da resistividade do meio em um ponto fixo, ao passo que a segunda gera dados com distribuição lateral (ou horizontal) além do componente vertical do meio. Há também diversas configurações de arranjos: Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente.

A escolha do arranjo a ser utilizado depende de alguns fatores: a profundidade de investigação desejada, a razão sinal/ruído e principalmente o tipo de alvo a ser mapeado – isso porque cada arranjo apresenta diferente resposta de resolução lateral/vertical da resistividade em subsuperfície (GANDOLFO, 2007).

No presente trabalho foi adotada a técnica do imageamento elétrico a partir do arranjo Wenner (Figura 4.3) devido aos bons resultados que o arranjo apresenta na investigação de estruturas horizontais, uma vez que o solo compactado do corpo da barragem de terra apresenta diferentes valores de permeabilidades verticais e horizontais ( $k_v \neq k_h$ ), o que pode contribuir para possíveis infiltrações horizontais.

**Figura 4.3:** Esquema dos arranjos Wenner

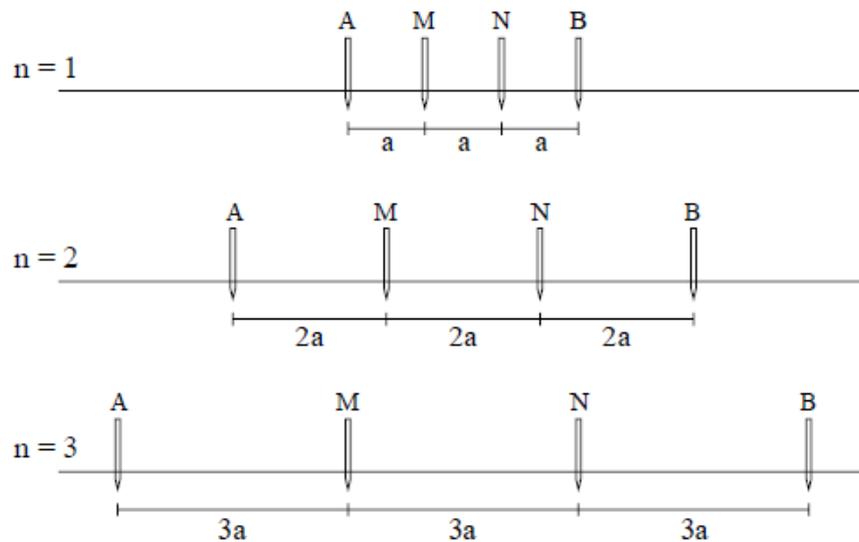


Fonte: Modificado de LOWRIE, 2007

A técnica do imageamento elétrico consiste na combinação de investigações laterais e verticais realizadas num mesmo ensaio, e a escolha do arranjo depende da sensibilidade do medidor, do nível de ruído da área e principalmente, pela estrutura a ser mapeada (no caso do presente estudo, a susceptibilidade de zonas saturadas no corpo das barragens).

No arranjo Wenner os eletrodos de potencial são mantidos a um mesmo espaçamento “a” constante. Para aumentar a profundidade de investigação é preciso aumentar o espaçamento entre os eletrodos (Figura 4.4). Quanto maior for o espaçamento “a” entre eletrodos, maior será a profundidade de investigação.

**Figura 4.4:** Arranjo Wenner e o espaçamento constante entre eletrodos.



Fonte: GANDOLFO, 2007

Segundo Gandolfo (2007) o arranjo Wenner apresenta bons resultados na investigação de estruturas horizontais, pois possui sensibilidade a variações verticais de resistividade, e oferece assim boa resolução vertical. Porém o arranjo apresenta pouca sensibilidade para variações horizontais de resistividade, e fornece baixa resolução horizontal e pouca definição de estruturas verticais. A maior vantagem do arranjo Wenner é a elevada razão sinal/ruído.

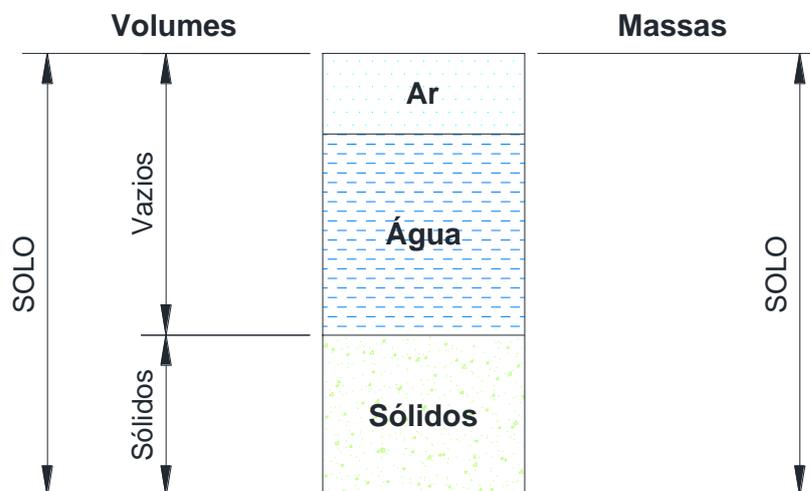
Contudo uma das desvantagens do arranjo é a perda de cobertura com o incremento da profundidade, o que pode ser uma grande desvantagem em lugares com pouco espaço para a realização de linhas, além da desvantagem da técnica do imageamento elétrico de excesso de ruídos com o aumento do espaçamento entre eletrodos.

### 4.3 – Ensaios Geotécnicos

#### 4.3.1- Índices físicos do solo

O solo é composto por elementos das três fases físicas: fase sólida, representada pelos minerais estruturados de tal forma a formar uma estrutura porosa, e nesses vazios do solo ocorre as outras duas fases do solo, a líquida e a gasosa (Figura 4.5). Em condições de saturação do solo, as três fases podem se transformar em duas, com os vazios do solo preenchidos apenas por água; ou em situações de solos extremamente secos, os vazios do solo podem ser compostos apenas por ar (NOGUEIRA, 2005).

**Figura 4.5:** Volumes e massas das três fases físicas do solo.



Fonte: NOGUEIRA, 2005

A fase sólida do solo é composta predominantemente por minerais decompostos das rochas. Há uma variação no tamanho de grãos que compõe determinado tipo de solo. Muitas das características e propriedades físicas do solo são ditadas pelo tamanho, composição química e forma dos grãos, além da forma como são arranjados (DAS, 2006).

Os índices físicos do solo são relações entre massas e volumes de fases constituintes do solo. O objetivo da determinação dos índices físicos do solo é caracterizar as condições existentes no solo no instante da amostragem. A tabela 4.1 apresenta o resumo dos índices físicos e a definição de cada um dos índices.

**Tabela 4.1:** Resumo e definição dos índices físicos do solo.

| <b>Índice Físico</b>         | <b>Definição</b>                       |
|------------------------------|----------------------------------------|
| Porosidade                   | Volume de vazios / Volume do solo      |
| Grau de Saturação            | Volume de água / Volume de vazios      |
| Índice de Vazios             | Volume de vazio / Volume de sólidos    |
| Teor de Umidade              | Massa de água / Massa de sólidos       |
| Massa Específica do Solo     | Massa do solo / Volume do solo         |
| Massa Específica dos Sólidos | Massa dos sólidos / Volume dos sólidos |
| Massa Específica da Água     | Massa da água / Volume da água         |

Fonte: NOGUEIRA, 2005

#### 4.3.1.1 - Massa específica do solo ( $\rho$ )

Existem dois principais métodos de determinação da massa específica do solo: método do Corpo de Prova Cilíndrico – onde é coletada uma amostra indeformada do solo e posteriormente é talhada um cilindro com medidas e volume conhecidos para a determinação de massa específica; e o método da Balança Hidrostática onde é coletado uma amostra indeformada do solo e aplicado uma fina camada de parafina por toda a amostra, para a determinação de todo o conjunto solo-parafina, ao ar e imerso em água destilada. Para o método da Balança Hidrostática – também conhecido como método de imersão - é importante determinar a temperatura da água destilada utilizada no ensaio (NOGUEIRA, 2005).

No presente estudo foi empregado o método da Balança Hidrostática em água destilada pela facilidade na coleta de amostras e pela dificuldade de manuseio e talhagem de um corpo de prova cilíndrico totalmente indeformado em solos compactados e muito argilosos. O processo de cálculo pelo método da imersão usa o princípio de Arquimedes (Equação 4.10):

$$V (\text{solo} + \text{parafina}) = \frac{W (\text{solo+parafina})_{ar} - W (\text{solo+parafina})_{imerso}}{\rho_w (T)} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Onde:

$V$  – corresponde ao volume;

$W$  – Corresponde ao peso;

$\rho_w$  – Corresponde a massa específica da água.

Para o cálculo do volume da parafina é utilizada a equação 4.11:

$$V(\text{parafina}) = \frac{M(\text{solo+parafina})_{ar} - M}{\rho(\text{parafina})} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

A massa específica da parafina  $\rho(\text{parafina}) = 912 \text{ kg/m}^3 = 0,912 \text{ g/cm}^3$ . O volume final da amostra será a diferença entre a equação 4.10 e a equação 4.11 expressos na equação 4.12:

$$V(\text{solo}) = V(\text{solo} + \text{parafina}) - V(\text{parafina}) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

O método da imersão também pode ser calculado em amostras imersas no mercúrio ao invés de água destilada, mas para tal finalidade a amostra deve possuir resistência à compressão suficiente para permitir a imersão no meio sem sofrer deformações e/ou alterações de volume. A unidade que expressa a massa específica do solo é  $\text{g/cm}^3$ .

#### 4.3.1.2 - Teor de umidade ( $w$ )

Para a determinação do teor de umidade ( $w$ ) é necessário determinar a massa de água e de sólidos existentes em um mesmo volume. Para a realização desse ensaio é necessário separar amostras do solo em cápsulas com peso conhecido, pesar cada conjunto de solo + cápsula e em seguida levar a estufa por pelo menos 6 horas em solos arenosos e 12 horas para solos argilosos. Após a secagem do material é necessário pesar novamente as cápsulas e determinar a massa dos sólidos e a massa de água. O teor de umidade é expresso em porcentagem. Para o cálculo do teor de umidade é utilizada a equação 4.13 para cada conjunto de cápsula, e o teor de umidade final será a média aritmética entre os valores de cada cápsula.

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Onde:

$w$  – corresponde ao teor de umidade;

$M_w$  – Corresponde à diferença da massa do conjunto solo + cápsula menos a massa do conjunto sólidos + cápsula;

$M_s$  – Corresponde a diferença de massas do conjunto sólidos + cápsula menos a massa da cápsula.

#### 4.3.1.3 – Massa específica seca ( $\rho_d$ )

A massa específica seca  $\rho_d$  é definida com a massa de sólidos existente no volume de solo analisado e é expressa pela equação 4.14:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Que também pode ser calculada pela equação 4.15:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

#### 4.3.1.4 – Índice de vazios ( $e$ )

O índice de vazios ( $e$ ) representa o volume dos poros do solo, que influencia diretamente nos valores de permeabilidade do solo. Pode ser expresso pela equação 4.16 ou pela equação 4.17:

$$e = \frac{\rho_s(1+w) - \rho}{\rho} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (\text{Eq. 4.17})$$

#### 4.3.1.5 – Porosidade ( $n$ )

A porosidade ( $n$ ) é outro índice representado em porcentagem e que pode ser expresso pela equação 4.18:

$$n = \frac{\rho_s(1+w) - \rho}{\rho_s(1+w)} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

#### 4.3.1.6 – Grau de Saturação ( $S_r$ )

O grau de saturação também é uma unidade expressa em porcentagem e pode ser definida pela equação 4.19.

$$S_r = \frac{\rho_s \cdot w}{e \rho_w} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

#### 4.3.1.7 – Massa específica da água ( $\rho_w$ )

A massa específica da água  $\rho_w$  varia com a temperatura e tal variação pode refletir em pequenas mudanças nas variáveis dos cálculos de determinação dos índices físicos. A tabela 4.2 apresenta os valores da massa específica da água entre as temperaturas de 16 a 23° C:

**Tabela 4.2:** Valores da Massa específica da água  $\rho_w$  em diferentes temperaturas.

| Temperatura em °C | Valor da Massa Específica g/cm <sup>3</sup> |
|-------------------|---------------------------------------------|
| 19                | 0,99841                                     |
| 19,5              | 0,99831                                     |
| 20                | 0,99820                                     |
| 20,5              | 0,99810                                     |
| 21                | 0,99799                                     |
| 21,5              | 0,99788                                     |
| 22                | 0,99777                                     |
| 22,5              | 0,99766                                     |
| 23                | 0,99754                                     |

Fonte: NOGUEIRA, 2005

#### 4.3.1.8 – Massa Específica dos Sólidos ( $\rho_s$ )

A massa específica dos sólidos de um solo é um índice que depende basicamente da composição mineralógica e da porcentagem de ocorrência de cada um deles. No processo de determinação da massa específica dos sólidos para solos argilosos, é necessário separar uma porção de 50g do solo, após a secagem da estufa, em um picnômetro: logo após, é necessário adicionar água destilada com volume conhecido até a formação de uma pasta homogênea. Em seguida é preciso remover todo o ar do conjunto sólidos + água, o que pode ser feito através

de uma bomba de vácuo ou através da fervura branda do picnômetro. Com isso é possível determinar a massa do conjunto picnômetro + sólidos + água.

Para o cálculo da massa específica dos sólidos  $\rho_s$  é empregada a equação 4.20, expressa por:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_1 + M_2} \cdot \rho_w \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Onde:

$M_s$  – Massa de sólidos determinada no final do ensaio;

$M_1$  – Massa do conjunto água + picnômetro + sólidos para a temperatura de ensaio;

$M_2$  – Massa do conjunto água + picnômetro obtida por curva de calibração do conjunto;

$\rho_w$  – Massa específica da água.

#### **4.3.2 – Análise granulométrica**

O ensaio de granulometria é importante para determinar a curva granulométrica do solo estudado e a proporção granulométrica entre o material do solo. Com o resultado do ensaio granulométrico é possível definir a classificação textural do solo, além da determinação dos coeficientes de curvatura e de uniformidade da porção grossa dos solos. O ensaio é realizado em duas etapas: peneiramento da porção grossa do solo e a etapa de sedimentação dos finos.

Na primeira etapa é necessário separar uma porção de solo com massa conhecida para o peneiramento. O conjunto de peneira a ser utilizado no ensaio deve ser determinado de acordo com os tamanhos máximo e mínimo dos grãos, estimados visualmente. As peneiras devem ser sobrepostas de maneira que as malhas das peneiras estejam ordenadas de forma decrescente e, após a última peneira, de menor abertura, deve estar locado o prato para coleta de material mais fino. Acima da primeira peneira, de maior abertura, deve estar posicionado a tampa para evitar perda de material.

O conjunto de peneiras com a amostra de solo deve ser levado à mesa vibratória por pelo menos 10 minutos. A soma das massas das partículas retidas em cada peneira, mais o material fino retido no prato deve ser aproximadamente igual a massa inicial da amostra, e a partir da massa retida individualmente em cada peneira, é possível determinar a granulometria do material (NOGUEIRA, 2005).

O ensaio de sedimentação de partículas finas está diretamente relacionado à velocidade de queda da partícula e é regido pela Lei de Stokes. Existem diversos fatores que influenciam os resultados do ensaio. O ensaio é realizado a partir da separação de uma porção do material fino do solo. Em seguida é preciso reservar a amostra por um período de 6 a 24 horas em imersão sobre ação de agente defloculante (o agente defloculante mais comum é o Hexametáfosfato de Sódio). O agente defloculante é para evitar que partículas se agreguem e interfere nos valores de velocidade de sedimentação. Após a ação do defloculante, é necessário completar a mistura com água destilada até 1000ml em uma proveta graduada.

Com o auxílio de um dispersor, é necessário agitar a solução antes do início das leituras de densidade. As leituras de densidade são realizadas com o auxílio de um densímetro. O densímetro é calibrado a uma temperatura de 20° C e nem sempre a temperatura de ensaio é a mesma da calibração do densímetro, por isso é preciso fazer a correção da leitura com a temperatura da solução na hora do ensaio (NOGUEIRA, 2005). As partículas finas possuem velocidade relativamente baixa de sedimentação, por isso as leituras de densidade da solução são realizadas em intervalos de 30s, 1 minuto, 2, 4, 8, 15, 30, 1 hora, 2h, 4h e 8h. O processo de cálculo de obtenção da porcentagem de partículas finas a partir do ensaio de sedimentação é complexo e foge ao tema principal do trabalho, por tanto para devidos fins, é recomendado a consulta a bibliografia específica sobre o ensaio - ABNT 07181/1984.

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria – peneiramento e sedimentação, é possível gerar a curva granulométrica do solo; e a curva fornece dados para a determinação do Coeficiente de Uniformidade ( $C_U$ ) e Coeficiente de Curvatura ( $C_C$ ). O  $C_U$  é um parâmetro adimensional que mede a inclinação média da curva e identifica se o solo possui uniformidade ou não – solo mal graduado e solo graduado. Pode ser determinado a partir da equação 4.21. Caso o valor de  $C_U$  seja inferior a 3, o solo será considerado uniforme. Caso o valor de  $C_U$  seja superior a 3, o solo será considerado não uniforme.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

Onde:

$D_{60}$  = Diâmetro obtido quando se passa 60% do material;

$D_{10}$  = Diâmetro obtido quando se passa 10% do material.

O  $C_C$  também é um parâmetro adimensional e avalia a classificação da graduação do solo. Ele é determinado pela equação 4.22. Caso os valores calculados de  $C_C$  estejam entre  $1 < C_C < 3$ , o solo é considerado bem graduado.

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{30}} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Onde:

$D_{30}$  = Diâmetro obtido quando se passa 30% do material.

### **4.3.3 – Permeabilidade**

Permeabilidade é a propriedade dos solos que indica a maior ou menor facilidade oferecida à passagem de água por intermédio de seus vazios. O parâmetro que expressa tal característica é denominada de coeficiente de permeabilidade. Quanto menor for o coeficiente de permeabilidade, menor será a vazão de fluidos que escoará pelos seus vazios (ALONSO, 2007).

#### 4.3.3.1 - Coeficiente de permeabilidade ( $k$ )

O coeficiente de permeabilidade pode ser definido como uma propriedade física que quantifica a taxa de escoamento que um fluido possui em escoar através vazios no solo sob determinada pressão (HEAD, 1981); ou, segundo Lambe & Whitman (1969), é a propriedade que indica a facilidade relativa com a qual o fluido pode fluir através do solo.

O engenheiro francês Henry Darcy investigou o fluxo de água através de camadas de areia, e publicou os resultados de suas pesquisas em 1856. Darcy provou que o escoamento de água através de uma coluna de areia saturada é proporcional à diferença de pressão hidráulica nos extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna (Equação 4.23) (CETESB 1978). Provou ainda que a mesma vazão  $Q$  é proporcional à área transversal do meio (Equação 4.24) e também à variação de cargas piezométricas atuantes no sistema (Equação 4.25).

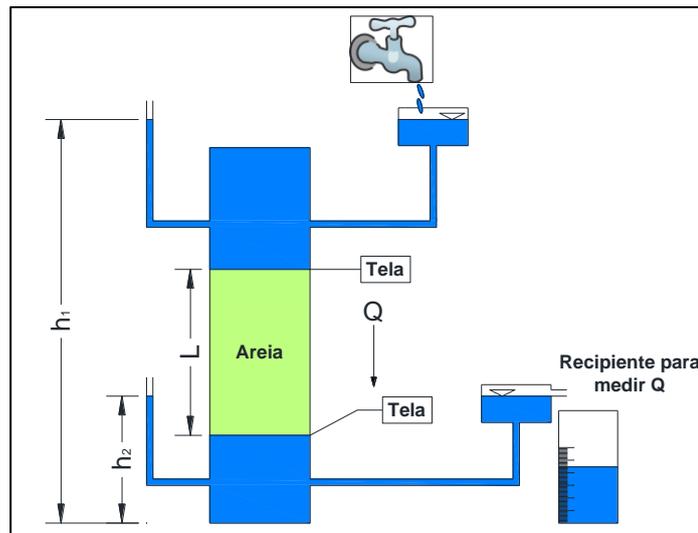
$$Q \propto \frac{1}{L} \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$Q \propto A \quad (\text{Eq. 4.24})$$

$$Q \propto (h_1 - h_2) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

Após as observações do experimento, Darcy adicionou uma constante de permeabilidade  $k$  e expressou matematicamente a Lei de Darcy (Equação 4.26), que ainda hoje é utilizada como princípio básico do fluxo de águas subterrâneas (Figura 4.6).

**Figura 4.6:** Esquema do arranjo experimental utilizado por Henry Darcy.



Fonte: Modificado de JESUS, 2012

$$Q = kA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

Onde:

$Q$  = representa a vazão do fluxo;

$k$  = constante de permeabilidade do meio;

$A$  = Área da seção transversal do trecho de material filtrante estudado;

$L$  = comprimento da amostra do material estudado;

$h$  = cargas piezométricas, onde  $h_1$  representa a carga piezométrica de entrada e  $h_2$  a carga piezométrica de saída do experimento.

Após algumas substituições, essa equação também pode ser escrita como (Equação 4.27):

$$Q = KiA \quad (\text{Eq. 4.27})$$

Onde:

$i$  = denominado de coeficiente hidráulico representa a diferença de cargas piezométricas dividido pelo comprimento do filtro. O coeficiente hidráulico  $i$  também pode ser expresso por (Equação 4.28):

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = - \frac{\Delta h}{L} = - \frac{dh}{dl} \quad (\text{Eq. 4.28})$$

Posteriormente é possível dividir  $Q$  por  $A$  e obter a equação 4.29;

$$v = Ki \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Onde  $v$  representa a velocidade de descarga no fluido na seção transversal  $A$ .

O coeficiente de permeabilidade  $k$  tem dimensões de velocidade, expresso comumente no sistema métrico pela unidade centímetros por segundo (cm/s). Os valores de  $k$  costumam ser baixos e por isso é normal serem expressos como produto de um número por uma potência negativa de 10. Isso é ilustrado na figura 4.7, que apresenta uma primeira avaliação da ordem de grandeza de  $k$  em função da granulometria do solo sem entrar no mérito da compacidade (solos granulares) ou consistência (argilas), fatores importantes e que não devem ser negligenciados.

**Figura 4.7:** Valores de permeabilidade em função da granulometria.



Fonte: MASSAD, 2003

Para fins práticos de engenharia, quando o coeficiente de permeabilidade for inferior a  $10^{-8}$  cm/s, o solo é considerado impermeável, ou seja, o fluxo de água é tão baixo que é

considerado desprezível. É importante citar que o concreto sem fissuras apresenta o coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-12}$  cm/s.

#### 4.3.3.2 - Fatores que influenciam $k$ e seus intervalos de variação

O coeficiente de permeabilidade  $k$  é uma propriedade do solo que varia para diferentes tipos de materiais. Existem fatores que influenciam diretamente no valor de  $k$ , por exemplo, a estratificação do solo, estruturas presentes no solo, mineralogia, granulometria e amplitude de variação granulométrica, a densidade da água, o grau de saturação do solo, temperatura e índice de vazios ( $e$ ).

##### *4.3.3.2.1 - Estratificação e estruturas do solo*

Algumas estruturas podem alterar o significativamente os valores da permeabilidade. Solos anisotrópicos apresentam estruturas como estratificação, que pode apresentar valores maiores de permeabilidade  $k_h$  (permeabilidade horizontal – paralela ao plano de estratificação) em relação a valores de permeabilidade  $k_v$  (perpendicular ao plano de estratificação).

Há outros tipos de estruturas do solo que afetam os valores de  $k$ , como descontinuidades, lentes, matéria orgânica e até grãos irregulares como matacões. Estruturas como solos flocculados tendem a apresentar maior índice de descontinuidades e também podem apresentar valores de  $k$  alterados devido a caminhos preferenciais de fluxo hídrico.

##### *4.3.3.2.2 – Granulometria e amplitude de variação granulométrica*

A granulometria é um dos fatores que influenciam a permeabilidade, principalmente solos com maiores percentuais de material grosso. Isso porque a porção dos finos, composto por silte e argila, possui uma menor amplitude de variação de tamanho de partículas em relação a areias. Porém, mesmo uma pequena variação da porção de finos pode afetar significativamente a permeabilidade. A tabela 4.3 apresenta um comparativo da diminuição da permeabilidade em filtros fabricados com agregados lavados *versus* um pequeno aumento da porcentagem de finos, menores que 150  $\mu$ m.

Outro fator importante é a textura e a forma dos grãos, pois a rugosidade dos grãos cria maior resistência de atrito com o fluido, o que dificulta o fluxo dinâmico entre os grãos. Portanto, grãos alongados e rugosos tendem a dificultar a passagem do fluido e diminuir os

valores de permeabilidade, ao passo que grãos lisos e esféricos tendem a apresentar melhor dinâmica de fluxo hídrico, com o aumento dos valores de permeabilidade.

**Tabela 4.3:** Influência da fração que passa na peneira 100 na permeabilidade de filtros de agregado lavado.

| Porcentagem que passa na peneira 100 | Valor da 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: JESUS, 2012

#### 4.3.3.2.3 – Mineralogia

A composição mineralógica pode ser outro importante fator de influência na permeabilidade, principalmente em argilas. Determinados tipos de argilas possuem maior capacidade de adsorção de água, com variação do tamanho efetivo dos poros. Tais argilas são comumente chamadas de argilas expansivas ou argilas porosas no meio geotécnico..

A capacidade de troca catiônica – CTC – em certas argilas tem maior importância em relação à permeabilidade. Os íons de sódio em argilas são os que mais influenciam os valores de  $k$ . Quanto menor for a capacidade de troca catiônica da argila, menor será o efeito dos íons na permeabilidade (JESUS, 2012).

#### 4.3.3.2.4 – Índice de vazios ( $e$ )

O grau de compactação e a maneira como o solo é disposto criam vazios e poros no meio. O índice de vazios ( $e$ ) bem como a relação de porosidade ( $n$ ) de um solo podem influenciar diretamente os valores de permeabilidade. Os dados utilizados para a determinação do índice de vazios, bem como a relação de porosidade do solo depende da massa específica dos sólidos, que por sua vez está diretamente relacionada à composição mineral. Logo, o índice de vazios também é influenciado pela mineralogia do solo.

#### 4.3.3.2.5 – Temperatura

A temperatura está relacionada à propriedade de viscosidade do fluido; quanto menor for a temperatura menor será a viscosidade, conseqüentemente, maior será a fluidez do fluido

e mais fácil será o escoamento pelo meio. A viscosidade é a propriedade que determina a resistência ou arraste do líquido oferecido ao movimento. Além de a temperatura afetar à viscosidade, ela também influencia o peso específico do líquido, e afeta também a densidade.

#### 4.3.3.2.6 – Grau de saturação ( $S_r$ )

O grau de saturação ( $S_r$ ) é outro fator determinante e crucial para a determinação da permeabilidade. É necessário saber a extensão dos vazios que são preenchidos com água, pois quanto menor o espaço de vazios já preenchidos por água, maior será a velocidade de percolação do fluido, e será máxima quando atingida a saturação completa. Além disso, bolhas de ar presentes no solo podem bloquear parte dos canais entre partículas, o que pode mascarar os valores de permeabilidade (JESUS, 2012). Na execução de ensaios de permeabilidade é necessário minimizar os efeitos indesejáveis de ar presente no solo.

#### 4.3.3.3 – Permeâmetro de Guelph

O permeâmetro de Guelph é um aparelho de campo utilizado para determinação de valores do coeficiente de permeabilidade do solo amostrado. O aparelho foi desenvolvido por Reynolds e Elrick na Universidade de Guelph, no Canadá, em 1983 (LISBOA, 2005). O princípio básico do método é simples e de certa forma análogo à experiência de Darcy: manter uma carga hidráulica constante a partir de uma garrafa de Mariotte, em uma seção de área conhecida e observar o valor da descarga de água no solo em um determinado tempo.

A caixa do equipamento também acompanha trado para execução dos furos de amostragem, bomba de vácuo e escovas (Figura 4.8).

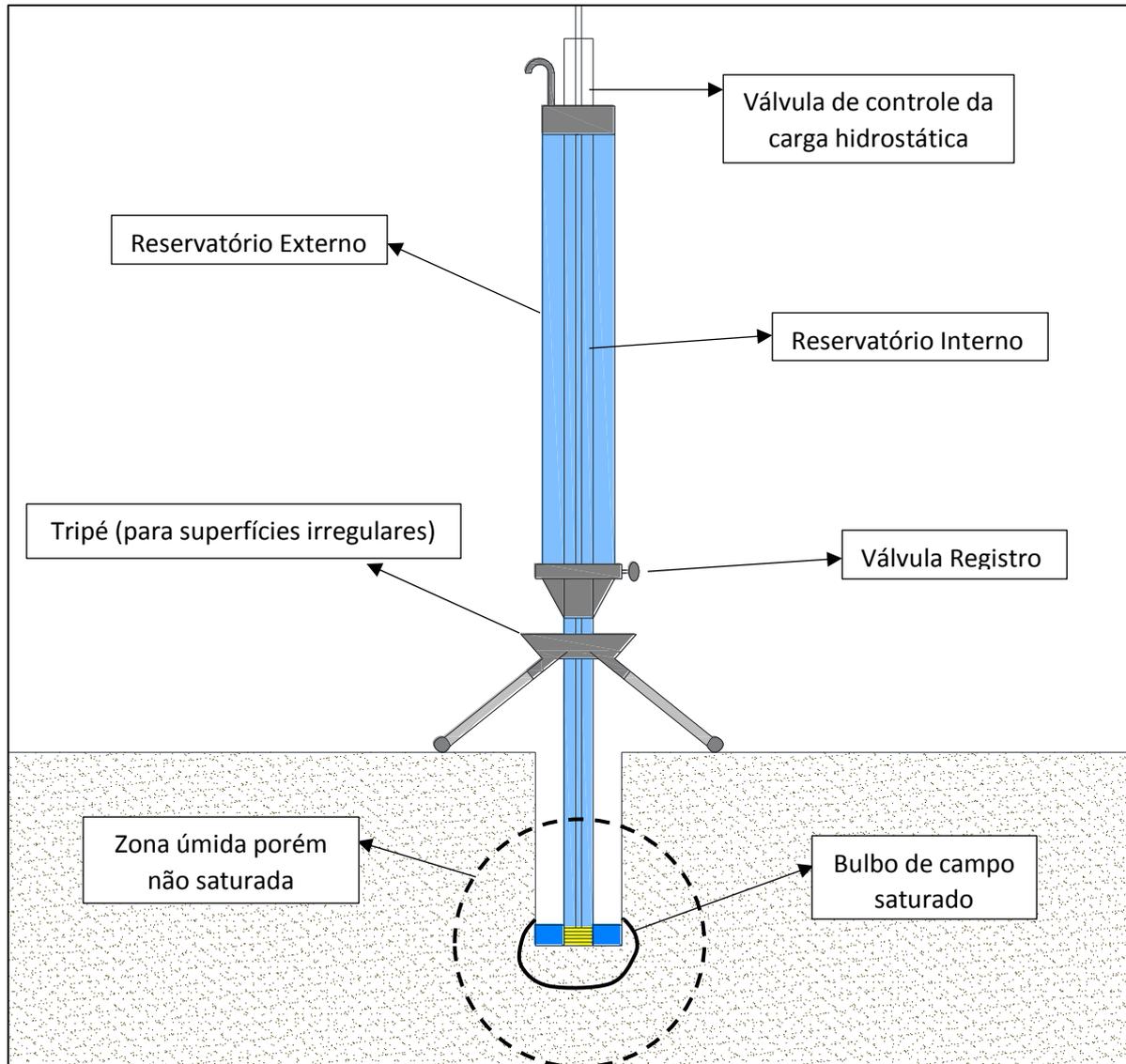
**Figura 4.8:** Caixa do equipamento – permeâmetro de Guelph.



Fonte: Arquivo pessoal.

O equipamento é composto por dois reservatórios graduados interconectados, denominados reservatório interno e reservatório externo; cabeça de medição de água para controle da coluna hidrostática; tubo de apoio com ponteira e arranjo do tripé quando necessário em superfícies irregulares (Figura 4.9).

**Figura 4.9:** Esquema do permeômetro de Guelph.



Fonte: Modificado de LISBOA, 2005

Os reservatórios podem ser utilizados simultaneamente ou apenas o reservatório interno. Para solos com valores estimados de permeabilidade maiores, é recomendável a utilização dos dois reservatórios, para solos com permeabilidade estimada baixa é aconselhável apenas a utilização do reservatório interno.

#### 4.3.3.4 – Cálculo da permeabilidade

O manual do equipamento fornece a expressão para cálculo da permeabilidade utilizado no presente estudo, que considera duas cargas hidráulicas variáveis (Equação 4.30). Esse foi o método empregado no presente trabalho.

$$K = (0,0041)(A)(R_2) - (0,0054)(A)(R_1) \quad (\text{Eq. 4.30})$$

Onde: A = área da seção interna do reservatório utilizado (que pode ser 2,15cm<sup>2</sup> para o reservatório interno – recomendado para solos com baixos valores de permeabilidade – ou 35,59cm<sup>2</sup> para a utilização dos dois reservatórios combinados);

R<sub>1</sub> = taxa de variação da coluna de água no reservatório pelo tempo após a regularização da queda hidrostática com altura fixa H=5cm;

R<sub>2</sub> = taxa de variação da coluna de água no reservatório pelo tempo após a regularização da queda hidrostática com altura fixa H=10cm;

## 5 – AQUISIÇÕES DE DADOS

A aquisição de dados foi executada em etapas de trabalho de campo e ensaios geotécnicos no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Geologia Aplicada – DGA da Unesp Rio Claro. A seguir são descritas as etapas de aquisição de dados.

### 5.1 – Dados geoeletricos

Os dados geoeletricos foram adquiridos em dois dias de trabalho de campo. A primeira etapa de trabalho foi realizada no município de Cordeirópolis. Em um dia de trabalho foram levantados 312m de dados geofísicos distribuídos em três linhas de imageamento elétrico dispostas paralelamente a crista e na direção de maior alongamento do corpo da barragem. Cada linha foi executada com 104 metros de comprimento, constando 53 eletrodos espaçados entre si a cada 2m. O espaço entre linhas adotado foi de 3m (Figura 5.1).

**Figura 5.1:** Localização das seções geofísicas na barragem de Cordeirópolis – SP.



Fonte: Modificado de Google 2015.

Todas as linhas foram dispostas na parte alta da crista da barragem, sendo que a linha 1 foi locada próxima à jusante do barramento. A linha 3 foi locada próxima à montante do

barramento. A linha 2 estava localizada na posição intermediária entre as linhas 1 e 3 (Figura 5.2).

**Figura 5.2:** Esquema das linhas geofísicas na área de estudos de Cordeirópolis – SP.



Fonte: Arquivo Pessoal

A segunda etapa da campanha de aquisição de dados geolétricos foi realizada no município de Ipeúna (Figura 5.3).

**Figura 5.3:** Localização das linhas Geofísicas na barragem de Ipeúna – SP.



Fonte: Modificado de Google 2015.

Em um dia de trabalho foram adquiridos 186m de dados geofísicos distribuídos em três linhas de imageamento elétrico também dispostas paralelamente à crista e à direção de maior alongamento do corpo da barragem. Cada linha foi executada com 62m de comprimento, 32 eletrodos espaçados entre si a cada 2m. Diferentemente do arranjo de Cordeirópolis, cada linha geofísica possuiu um espaçamento entre linhas de 2m, devido às menores dimensões de largura do corpo da barragem (Figura 5.4)

**Figura 5.4:** Esquema das linhas geofísicas na área de estudos de Ipeúna – SP.



Fonte: Arquivo Pessoal

A linha 1 também foi executada próxima à jusante do barramento. A linha 3 foi executada em uma localização próxima à montante do barramento. A linha 2 é localizada na posição intermediária da barragem.

Para ambas barragens os parâmetros de aquisição foram: 100mA de corrente, tempo de aquisição de 1s. O equipamento utilizado foi o resistímetro ABEM Terrameter LS de 84 canais e potência de 250W (Figura 5.5). Esse equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido (ABEM, 2012).

**Figura 5.5:** Resistivímetro ABEM Terrameter LS em operação.



Fonte: Arquivo Pessoal

## 5.2 – Dados geotécnicos

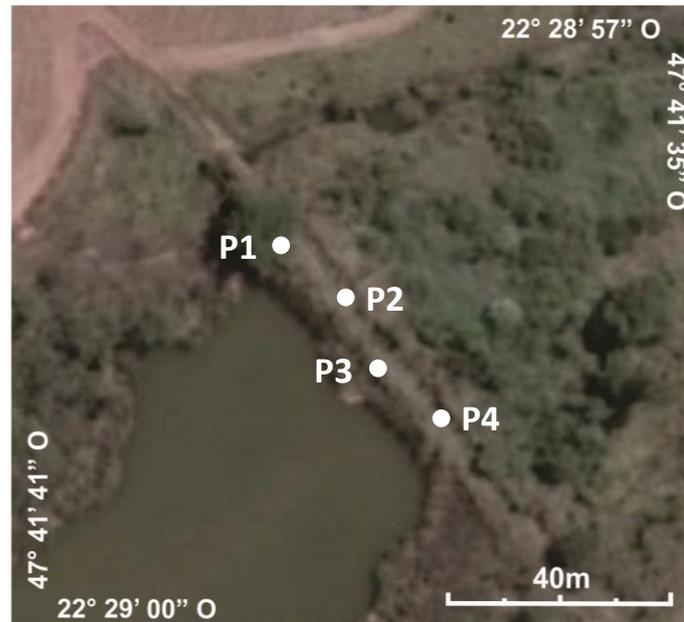
Para uma maior facilidade nos tratamentos dos dados, os trabalhos referentes a coleta de amostras, ensaios de permeabilidade, ensaios de determinação dos índices físicos dos solos e análise granulométrica são compilados no item *Ensaio Geotécnicos*.

Todos os ensaios de permeabilidade foram executados a uma profundidade média de 80 centímetros em relação à superfície. Os dados geoeletricos nortearam a locação dos ensaios geotécnicos, por isso o critério de definição dos pontos a serem amostrados foi a busca de pontos de maior contraste com os valores de resistividade.

As amostras para a realização dos ensaios de laboratórios de determinação dos índices físicos e análise granulométrica foram coletadas na mesma campanha da realização dos ensaios de permeabilidade. As amostras da barragem de Ipeúna foram coletadas no mesmo local de realização equivalente ao ponto 2 do ensaio de permeabilidade. As amostras da barragem de Cordeirópolis foram coletadas no mesmo local de realização equivalente ao ponto 4 do ensaio de permeabilidade.

Os dados de ensaios de permeabilidade foram realizados em campo a partir do equipamento permeâmetro de Guelph. Foram realizadas duas campanhas de aquisição. Um dia para cada barragem estudada. A primeira campanha foi executada na barragem do município de Ipeúna, onde foram investigados quatro pontos dispostos ao longo do corpo da barragem de forma alternada como indicado na figura 5.6.

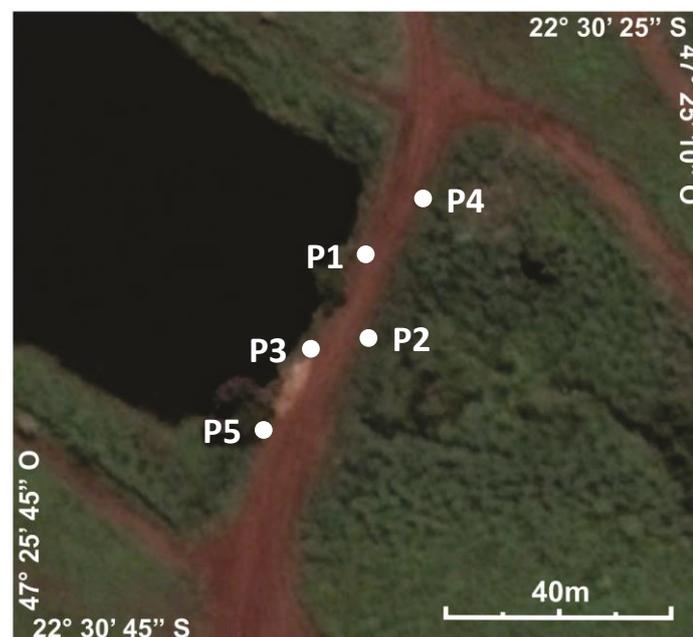
**Figura 5.6:** Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Ipeúna.



Fonte: Modificado de Google 2015.

Na segunda etapa de aquisição foram realizadas medidas na barragem de Cordeirópolis. Por ser uma barragem de maiores dimensões foram ensaiados cinco pontos com o permeâmetro de Guelph no local. A figura 5.7 apresenta a disposição dos pontos ensaiados.

**Figura 5.7:** Localização dos pontos dos ensaios de permeabilidade na barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Modificado de Google 2015.

## 6 – RESULTADOS

Os dados geofísicos coletados nas duas campanhas de campo foram primeiramente processados no programa Res2Dinv (Geotomo *Software*), para geração de modelos de inversão de dados e a partir dos dados de entrada (dados gerados em campo), foram gerados três produtos: pseudo-seção, seção calculada e modelos de inversão em duas dimensões – 2D, a partir do algoritmo de mínimos quadrados.

O programa executa o modelo matemático dos mínimos quadrados que adequa os valores e interliga os dados com suavização dos valores extremos a partir do modelo de blocos, que reduz diferença entre os valores de resistividade elétrica medida e a modelada. Esse modelo de blocos gera um parâmetro de desvio padrão denominado fator RMS (*Root Mean Squared*), que representa a variação dos extremos dos dados de entrada, potencializado após o processamento (MOREIRA; PEREIRA; CAVALHEIRO, 2014).

A malha amostral de dados geofísicos foi planejada com o objetivo de interpolação lateral das linhas a partir dos valores de resistividade medida e dos modelos de inversão 2D, por meio do método da mínima curvatura, com auxílio do programa Oasis Montaj, plataforma Geosoft, para geração de horizontes ou superfícies de suavização 2D para diversas profundidades. A partir da interpolação lateral das linhas modeladas foram geradas imagens em três dimensões – 3D.

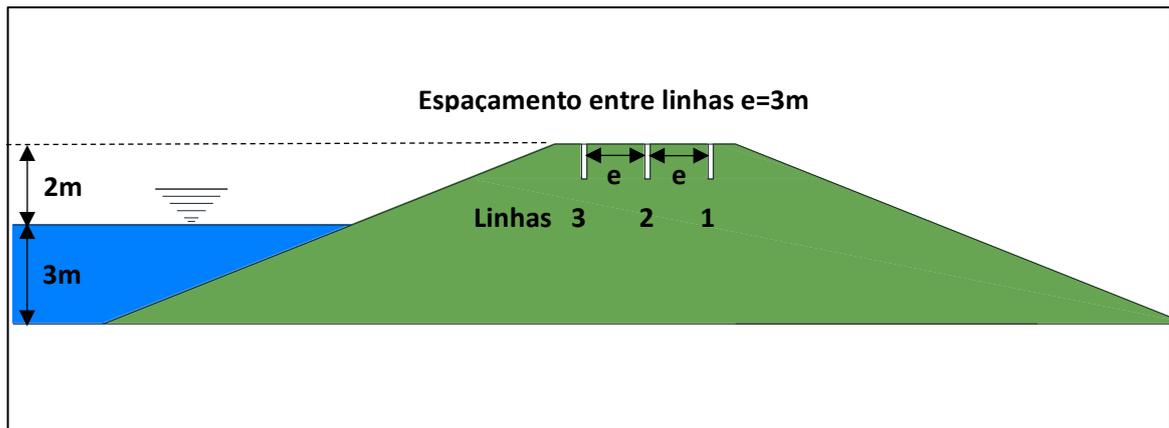
Os valores de resistividade elétrica são expressos em  $\Omega.m$ , por meio de uma escala cromática para análise da variação dos valores de resistividade. A fim de facilitar a comparação direta dos resultados entre as duas barragens e os produtos 2D e 3D, a escala cromática de cores utilizada foi padronizada para todas as imagens de geofísica apresentadas no trabalho.

### 6.1 – Barragem de Cordeirópolis

#### 6.1.1 – Resultados geoeletricos

As imagens geoeletricas 2D foram denominadas de linha 1, linha 2 e linha 3. Foram adquiridos 312m de caminhamento elétrico divididos em três linhas (montante, central e jusante) (Figura 6.1). Cada linha teve 104m de comprimento, o que permitiu cobrir toda a extensão da barragem e alcançou uma resolução de aproximadamente 17m de profundidade.

**Figura 6.1:** Esquema da disposição das linhas geofísicas em corte transversal a barragem.



Fonte: Dados da Pesquisa

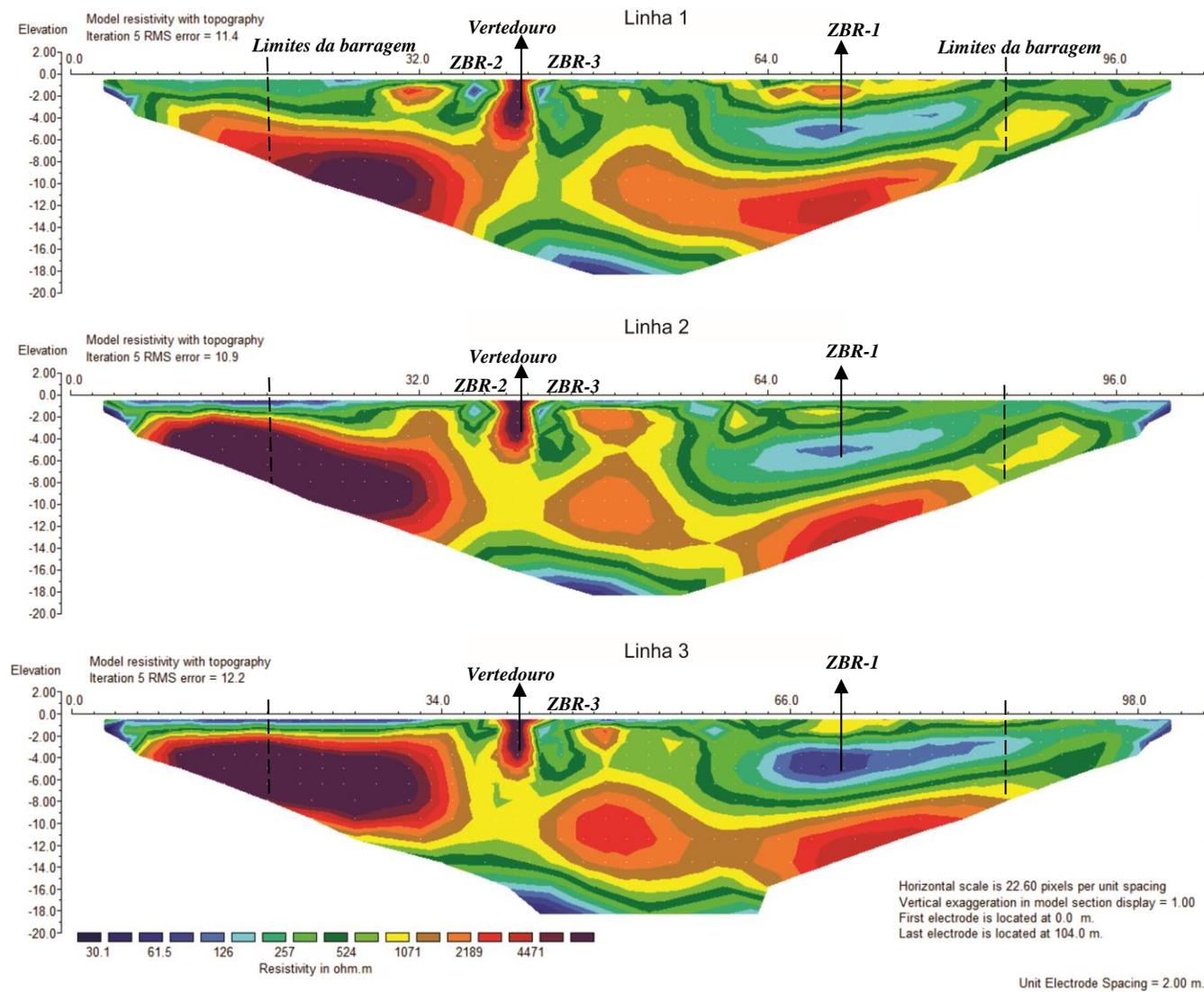
A figura 6.2 apresenta algumas zonas com alto contraste de resistividade elétrica. A priori é possível identificar o alto valor de resistividade do vertedouro de concreto que aparece na porção esquerda da linha, nos eletrodos entre as estacas 40 e 42m. Em seguida há duas principais zonas de baixa resistividade relativas a serem observadas. Para maior facilidade nas discussões, tais áreas são denominadas de *Zona de Baixa Resistividade (ZBR)*.

A *ZBR-1* ocorre na porção média direita da barragem. Na linha 1 ocorre com aproximadamente 22m de comprimento lateral e a uma distancia de 2m da superfície. Tal zona está locada na figura aproximadamente entre 60 e 82m lateralmente, e aproximadamente entre 4 e 6m da superfície. Os valores de resistividade variam entre 60  $\Omega.m$  e 180  $\Omega.m$ , com os menores valores na porção central. A *ZBR-2* ocorre de forma pontual ao lado esquerdo do vertedouro, a aproximadamente 2m da superfície, com valores de resistividade muito próximos ao da *ZBR-1*. De maneira análoga à *ZBR-2*, a *ZBR-3* ocorre pontualmente ao lado direito do vertedouro.

A linha 2 foi executada paralelamente às outras linhas e compreende a porção intermediária entre a linha 1 e linha 3, distantes 3m de cada. Na linha 2 é possível identificar a *ZBR-1* com as dimensões aproximadas da linha 1, porém com um pequeno incremento de tamanho da porção central. Já a *ZBR-2* e a *ZBR-3* ocorrem com menor intensidade.

A linha 3 foi executada a 3m da linha 2 e compreende a linha com dados mais próximos à montante da barragem. É possível identificar um aumento das dimensões da *ZBR-1* em relação às outras linhas. Tal zona ocorre por aproximadamente 31m lateralmente. Outro fator importante é a diminuição da resistividade na porção central da *ZBR-1* que passa a apresentar valores abaixo de 60  $\Omega.m$ . A *ZBR-2* não ocorre na linha 3, enquanto a *ZBR-3* ocorre com muito pouca intensidade.

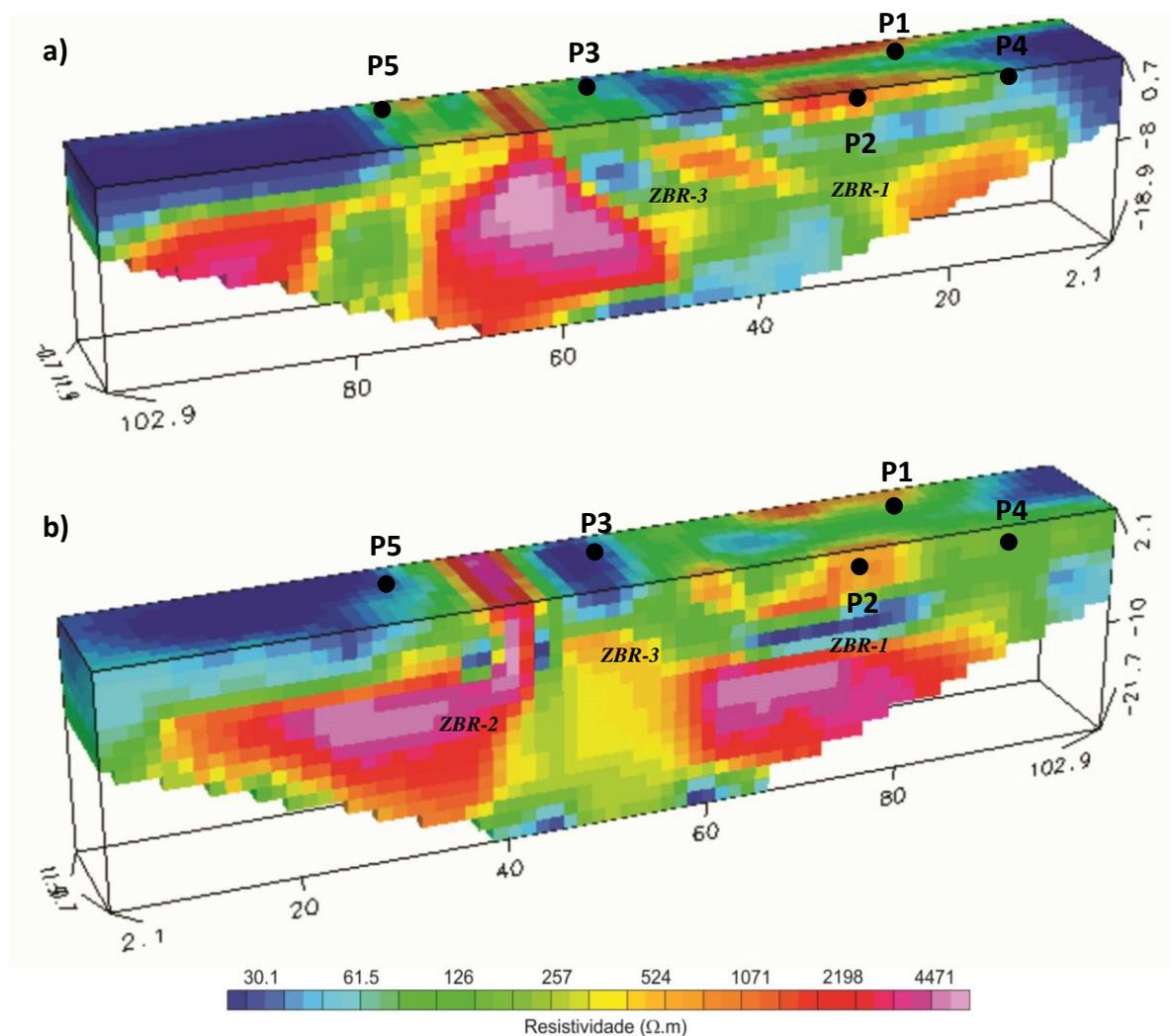
**Figura 6.2:** Linhas de imageamento elétrico 1, 2 e 3 – Cordeirópolis.



Fonte: Dados da Pesquisa

Na lateral esquerda da figura 6.2 é possível identificar uma zona de alta resistividade. Essa zona pode ser interpretada como prováveis blocos de matacões da Fm. Serra Geral. As imagens 2D apresentam aparentemente uma evolução das zonas de baixa resistividade no sentido de montante para jusante. Inicialmente foram geradas em forma de modelo de visualização 3D em blocos, posteriormente, a partir do método da mínima curvatura foram gerados mapas de níveis. Na figura 6.3 estão dispostos dois modelos de visualização 3D. No primeiro (a) são representados os dados de resistividade medidos, e no segundo (b) são representados os valores de resistividade elétrica modelados.

**Figura 6.3:** Modelo de visualização 3D em blocos com as resistividades medida (a) e resistividade modelada (b), com posicionamento dos pontos de ensaio de permeabilidade.

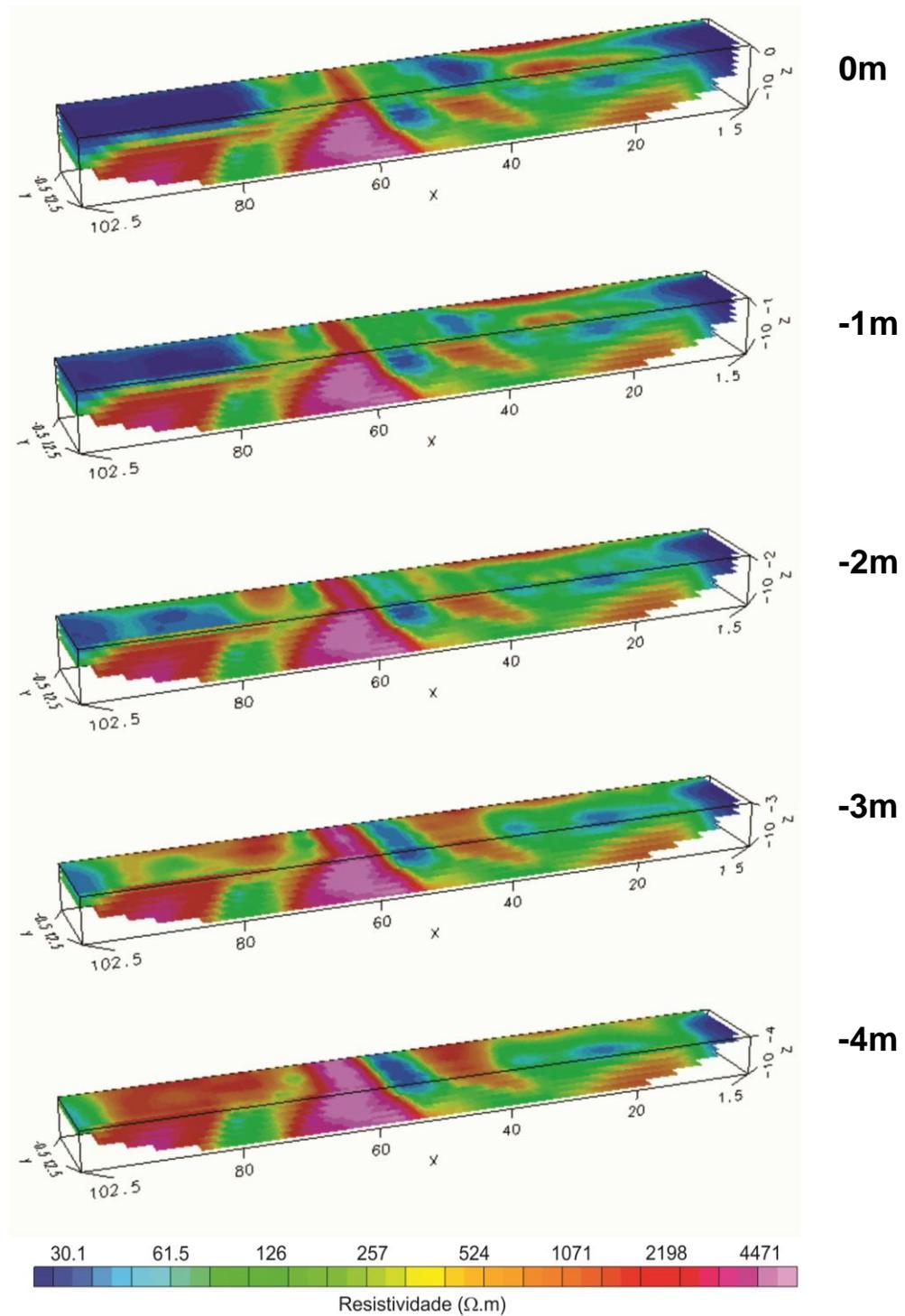


Fonte: Dados de Pesquisa

O modelo de visualização 3D de bloco foi interpolado a partir do método da mínima curvatura para a geração de mapas de profundidade. A ZBR-3 é nítida quando são gerados os níveis de investigação do bloco com os dados da resistividade medida (Figuras 6.4 e 6.5), ao

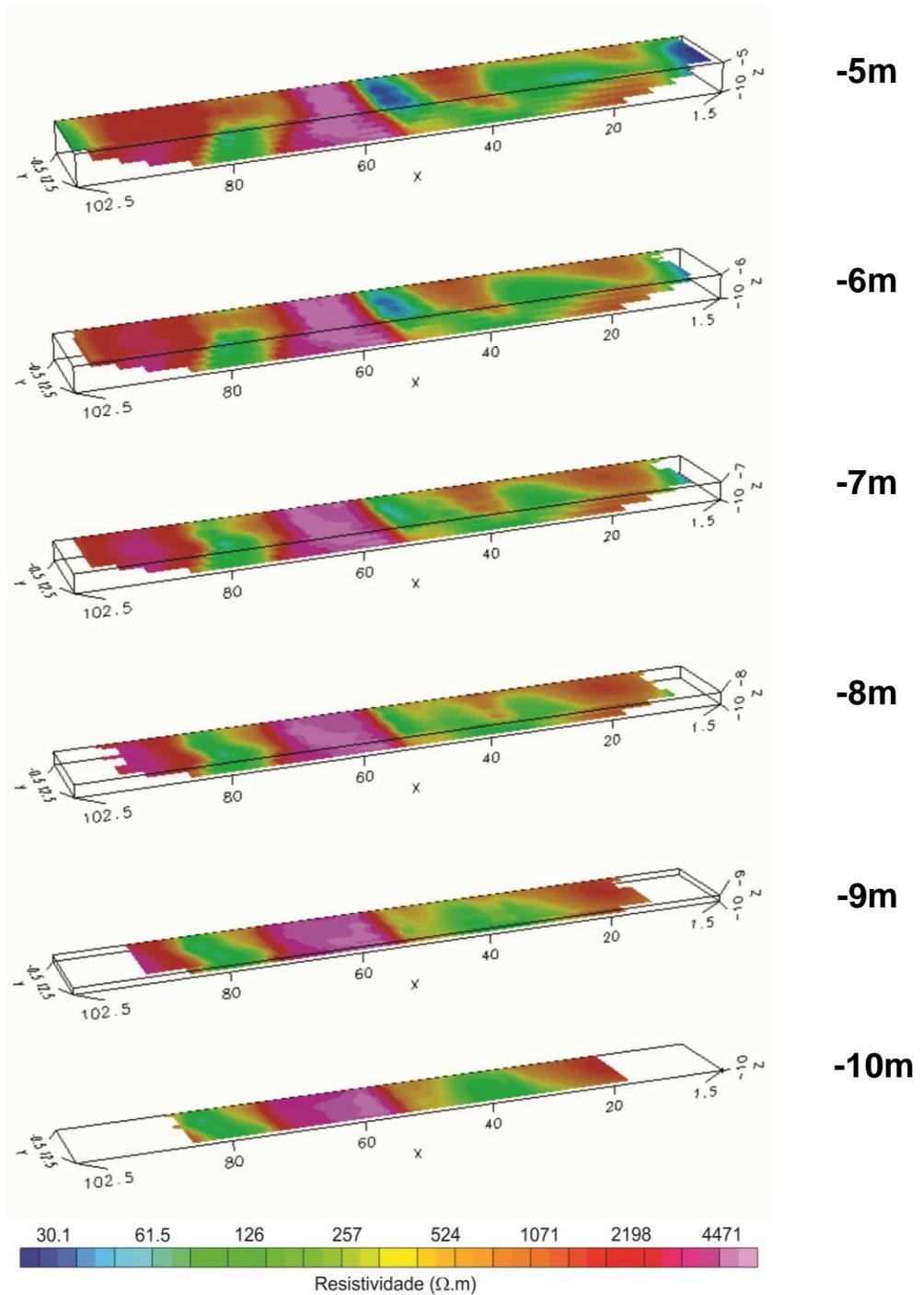
passo que as *ZBR-1* e *ZBR-2* são intensificadas com as imagens geradas a partir dos dados modelados (Figuras 6.6 e 6.7).

**Figura 6.4:** Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (0 a 4m).



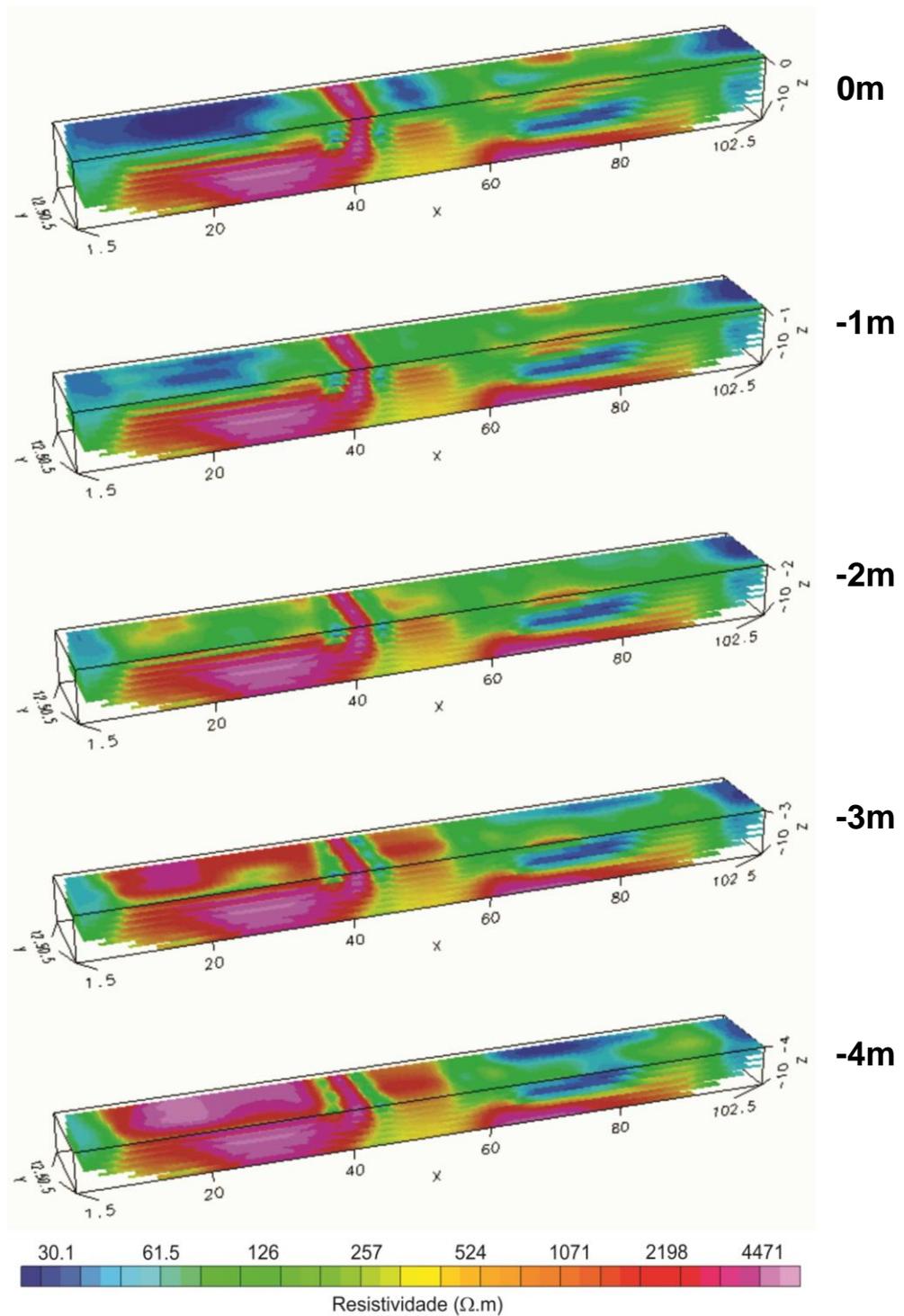
Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.5:** Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (5 a 10m).



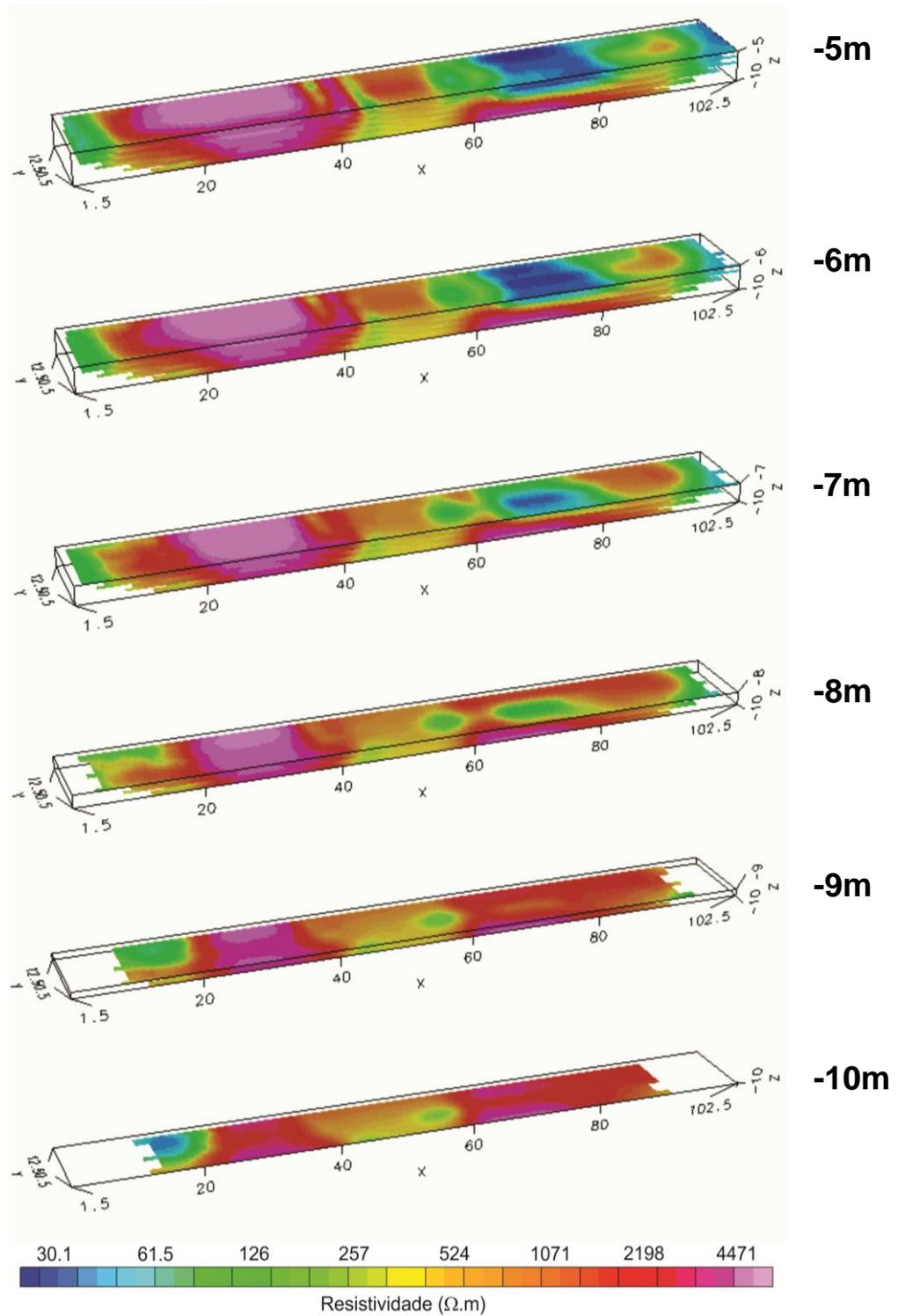
Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.6:** Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (0 a 4m).



Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.7:** Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Cordeirópolis separados por níveis (6 a 10m).



Fonte: Dados de Pesquisa

### 6.1.2 – Resultados dos ensaios Geotécnicos – Barragem de Cordeirópolis

Os resultados dos ensaios de permeabilidade foram obtidos através do ensaio de campo com do permeâmetro de Guelph e são apresentados na tabela 6.1. Para a realização do ensaio e obtenção dos valores de  $k$  existem alguns fatores que influenciam nos resultados, como já abordado no Capítulo 4. Na realização do ensaio em campo, nos pontos 2 e 4 foram obtidos valores negativos de  $k$  que acabaram descartados da análise por serem negativos e não representarem os valores reais de permeabilidade do solo. Os outros três pontos amostrados indicaram valores de grandeza  $10^{-5}$  cm/s, o que é um valor relativamente baixo de  $k$ .

**Tabela 6.1:** Síntese dos resultados de permeabilidade da barragem de Cordeirópolis a partir do permeâmetro de Guelph.

| Ponto de Ensaio | Valor da permeabilidade (cm/s) |
|-----------------|--------------------------------|
| Ponto 1         | $1,07 \times 10^{-5}$          |
| Ponto 2 *       | $-2,3 \times 10^{-5}$          |
| Ponto 3         | $5,4 \times 10^{-5}$           |
| Ponto 4 *       | $-6,3 \times 10^{-6}$          |
| Ponto 5         | $1,18 \times 10^{-5}$          |

\* os pontos com valores negativos de permeabilidade foram descartados de análise.

Fonte: Dados de Pesquisa

A tabela 6.2 apresenta a síntese dos resultados obtidos a partir das amostras.

**Tabela 6.2:** Síntese dos resultados dos índices físicos para amostra de solo da barragem de Cordeirópolis – SP.

| Índice Físico                        | Barragem Cordeirópolis |
|--------------------------------------|------------------------|
| Teor de umidade                      | 11,78%                 |
| Massa Esp. do Solo ( $\rho$ )        | $1,74 \text{ g/cm}^3$  |
| Massa Esp. dos Sólidos ( $\rho_s$ )  | $2,91 \text{ g/cm}^3$  |
| Massa Esp. Seca do Solo ( $\rho_d$ ) | $1,56 \text{ g/cm}^3$  |
| Índice de Vazios ( $e$ )             | 0,87                   |
| Porosidade ( $\eta$ )                | 46,50%                 |
| Grau de Saturação ( $S_r$ )          | 39,45%                 |

Fonte: Dados de Pesquisa

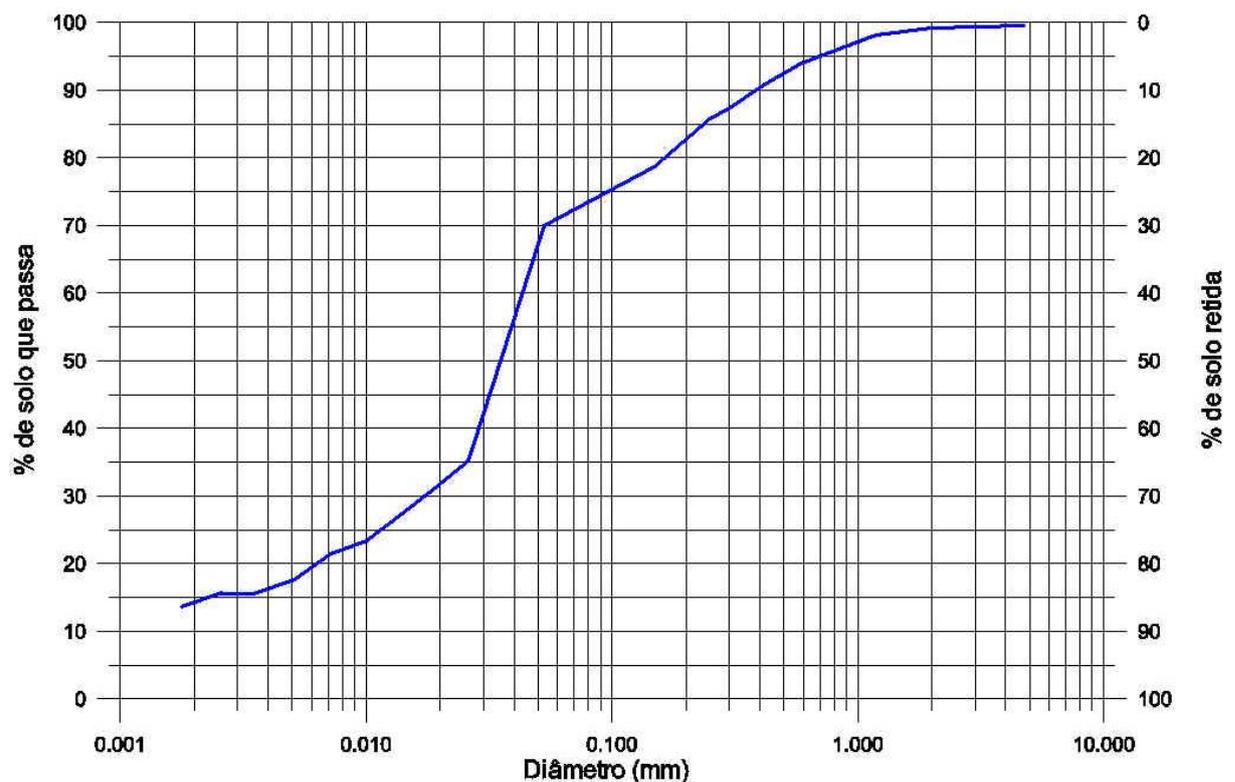
Os resultados da análise granulométrica são apresentados no anexo A e contém os valores específicos do peneiramento com as porcentagens retidas em cada peneira e os resultados da sedimentação de partículas finas. Além disso, a figura 6.8 apresenta a curva granulométrica do solo.

A partir da curva granulométrica, é possível determinar para o material granular do solo amostrado o Coeficiente de não Uniformidade ( $C_U$ ), expresso na equação 6.1, e o Coeficiente de Curvatura ( $C_C$ ) expresso na equação 6.2. Pelo gráfico da curva granulométrica os valores de  $D_{60} = 0,043$ ;  $D_{30} = 0,017$  e  $D_{10} = 0,001$  (valor extrapolado).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,043}{0,001} = 43 \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0,017^2}{0,001 \cdot 0,043} = 6,7209 \quad (\text{Eq. 6.2})$$

**Figura 6.8:** Curva granulometrica da amostra de solo de Cordeirópolis – SP.



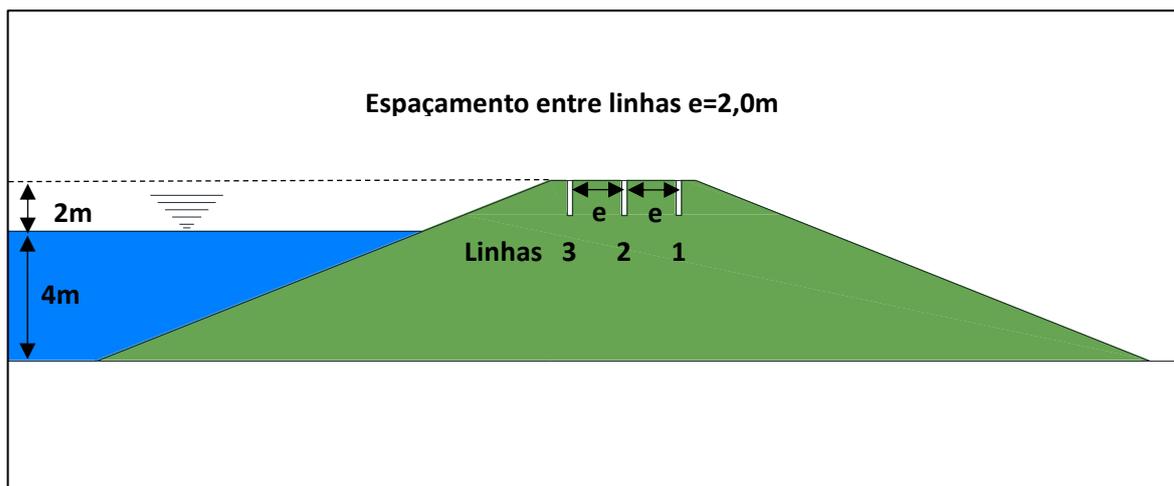
Fonte: Dados de Pesquisa

## 6.2 – Barragem de Ipeúna

### 6.2.1 – Resultados geoeletricos

Na barragem de Ipeúna foi utilizado o mesmo critério de dados gerados nas etapas de campo da barragem de Cordeirópolis, com uma sensível diferença no espaçamento entre as linhas geofísicas, uma vez que a barragem de Ipeúna possui uma largura da crista menor em relação à barragem de Cordeirópolis. O espaçamento entrelinhas utilizado foi de 2m. Foram adquiridos 186m de caminhamento elétrico divididos em três linhas (montante, central e jusante). Cada linha foi executada com 32 eletrodos espaçados a cada 2m, o que permitiu uma profundidade média de 10m de investigação. A disposição das linhas é determinada para linha 1 na porção mais próxima a jusante, linha 3 mais próxima a montante e a linha 2 na posição intermediária (Figura 6.9). A barragem de Ipeúna possui o vertedouro no canto da barragem, por tanto, nesse caso, foi possível fazer o caminhamento elétrico fora da área de influência do vertedouro.

**Figura 6.9:** Esquema da disposição das linhas geofísicas em corte transversal a barragem.



Fonte: Dados da Pesquisa

Nas linhas de imageamento elétrico existem duas zonas de baixa resistividade (*ZBRs*) e uma zona de alta resistividade (*ZAR*). A linha 1 é a seção que apresenta maiores contrastes dos valores de resistividade (Figura 6.10). A *ZBR-1* ocorre na porção esquerda da linha, lateralmente entre 2 e 16m e entre 1,5 a 5m distante da superfície com valores entre 30  $\Omega.m$  e 200  $\Omega.m$ . A *ZBR-2* ocorre na porção centro inferior da linha com uma forma irregular. Com

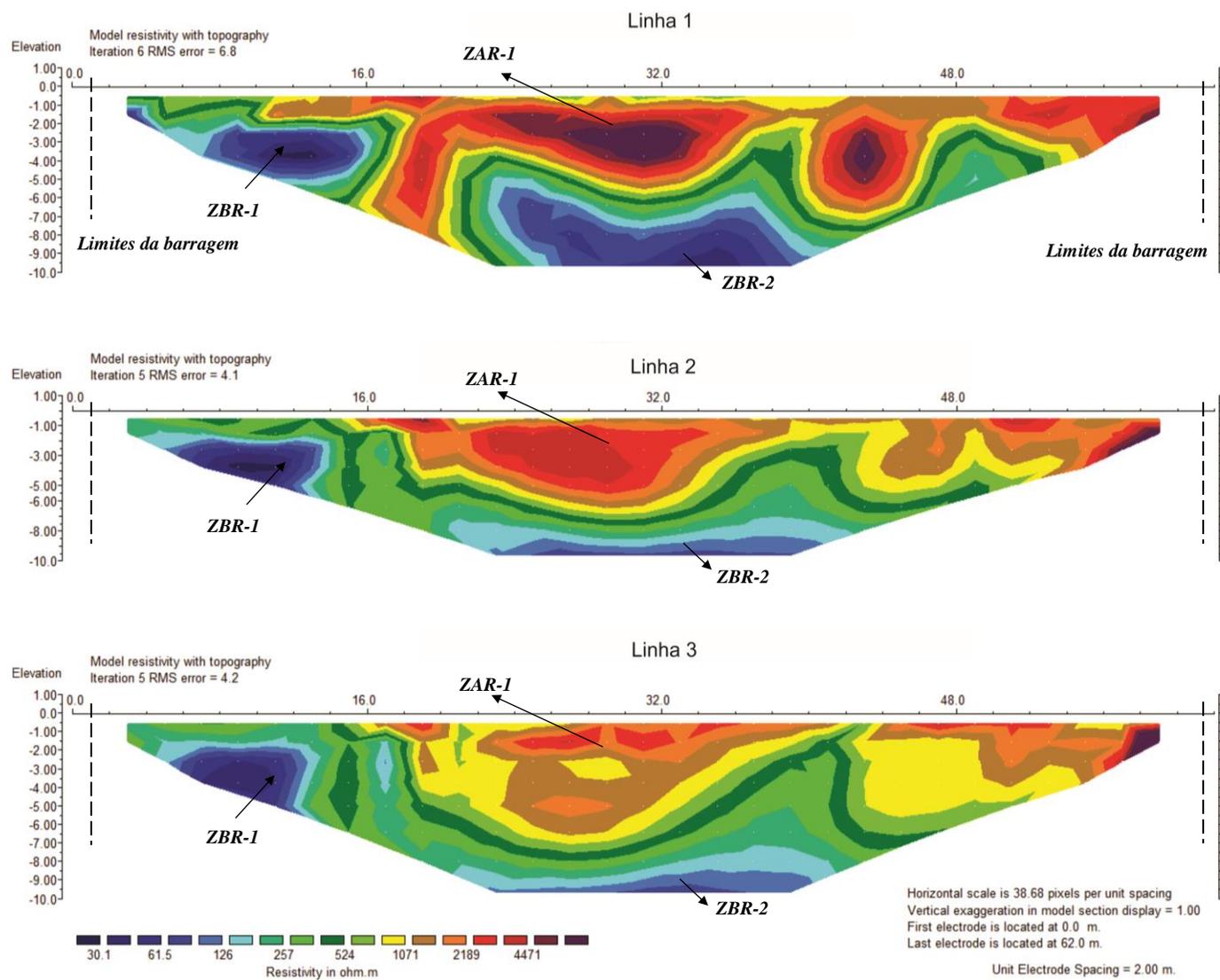
distribuição lateral entre 22 e 40m, a uma distância média de 5m da superfície. A variação da resistividade nas *ZBRs* é 30  $\Omega$ .m a 200  $\Omega$ .m.

A zona de alta resistividade está localizada na porção médio superior das linhas. A *ZAR-1* ocorre lateralmente entre 22 e 36m e 0,5 a 4m da superfície. A resistividade apresenta valores aproximados de 2000  $\Omega$ .m a 5000  $\Omega$ .m.

A linha 2, executada na porção intermediária entre as linhas 1 e 3, também apresenta as mesmas zonas de alta e baixa resistividade. A *ZBR-1* possui praticamente mesmo tamanho e mesma intensidade tanto na linha 1, quanto na linha 2. Porém a *ZBR-2* diminui de tamanho, principalmente no sentido vertical, onde ocorre a partir de 7m da superfície. A *ZAR-1* apresenta geometria parecida com a da linha 1, porém as intensidades dos valores de resistividade são diferentes, com uma variação de valores entre 1000  $\Omega$ .m e 2000  $\Omega$ .m.

A linha 3 é a linha locada mais próxima a montante da crista da barragem. As zonas de baixa resistividade, *ZBR-1* e *ZBR-2* possuem menores valores relativos de resistividade do que nas outras linhas e apresentam uma tendência a se encontrar. A zona de alta resistividade ocorre de forma menos intensa em relação às linhas 1 e 2. A *ZAR-1* ocorre entre 22 e 34m lateralmente e entre 0,5 e 2,5m distante da superfície. Os valores de resistência variam entre 1000  $\Omega$ .m e 1700  $\Omega$ .m.

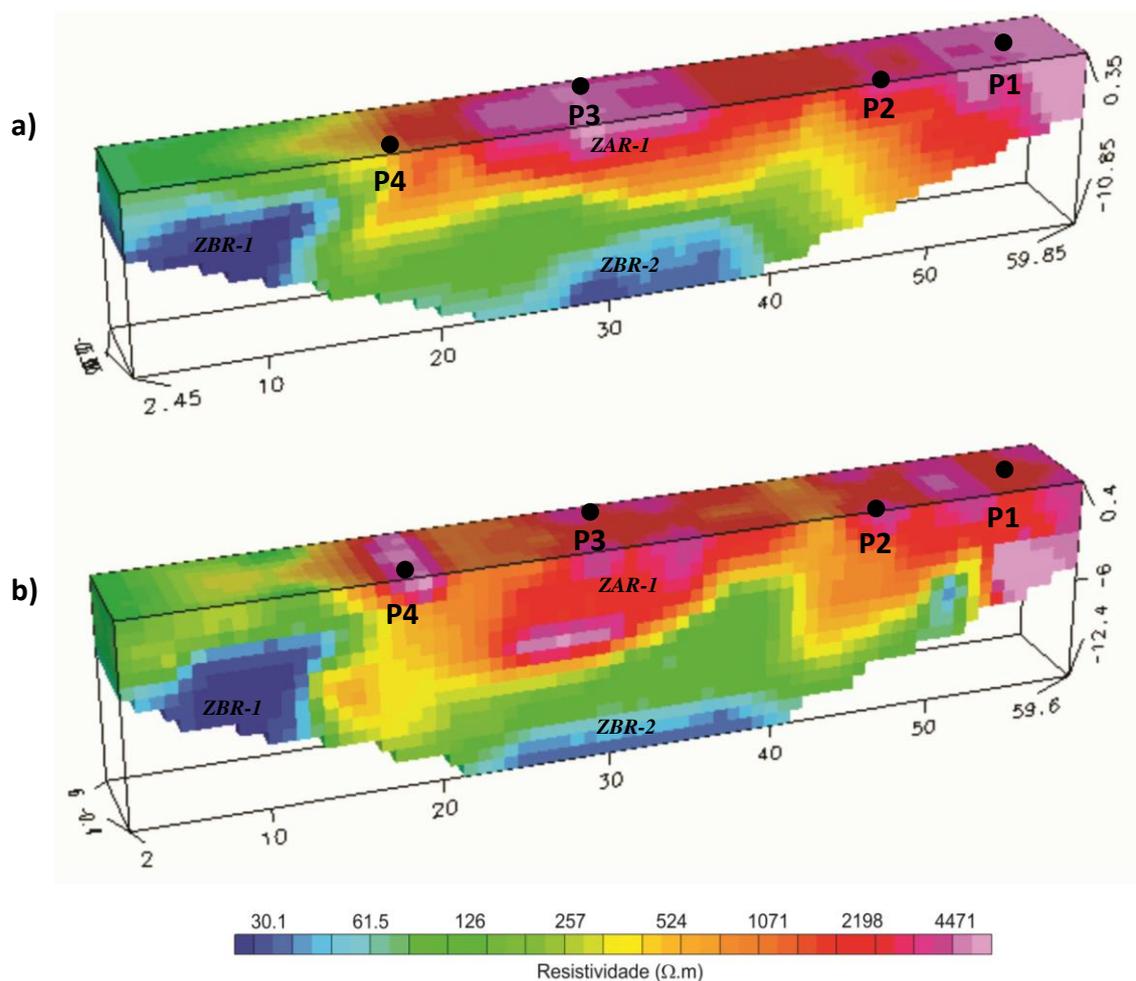
Figura 6.10: Linhas de imageamento elétrico 1, 2 e 3 – Ipeúna.



Fonte: Dados de Pesquisa

Baseado na análise dos modelos de inversão é possível afirmar uma continuidade tanto das zonas de baixa resistividade, quanto de alta resistividade no sentido de montante para jusante. Esse padrão é observado em menor escala nos modelos de visualização em 3D (Figura 6.11). No modelo de visualização de 3D são apresentados o bloco com os dados da resistividade medida do meio na parte superior, e na porção inferior os dados das seções modeladas a partir do modelo de inversão e interpoladas com auxílio do programa.

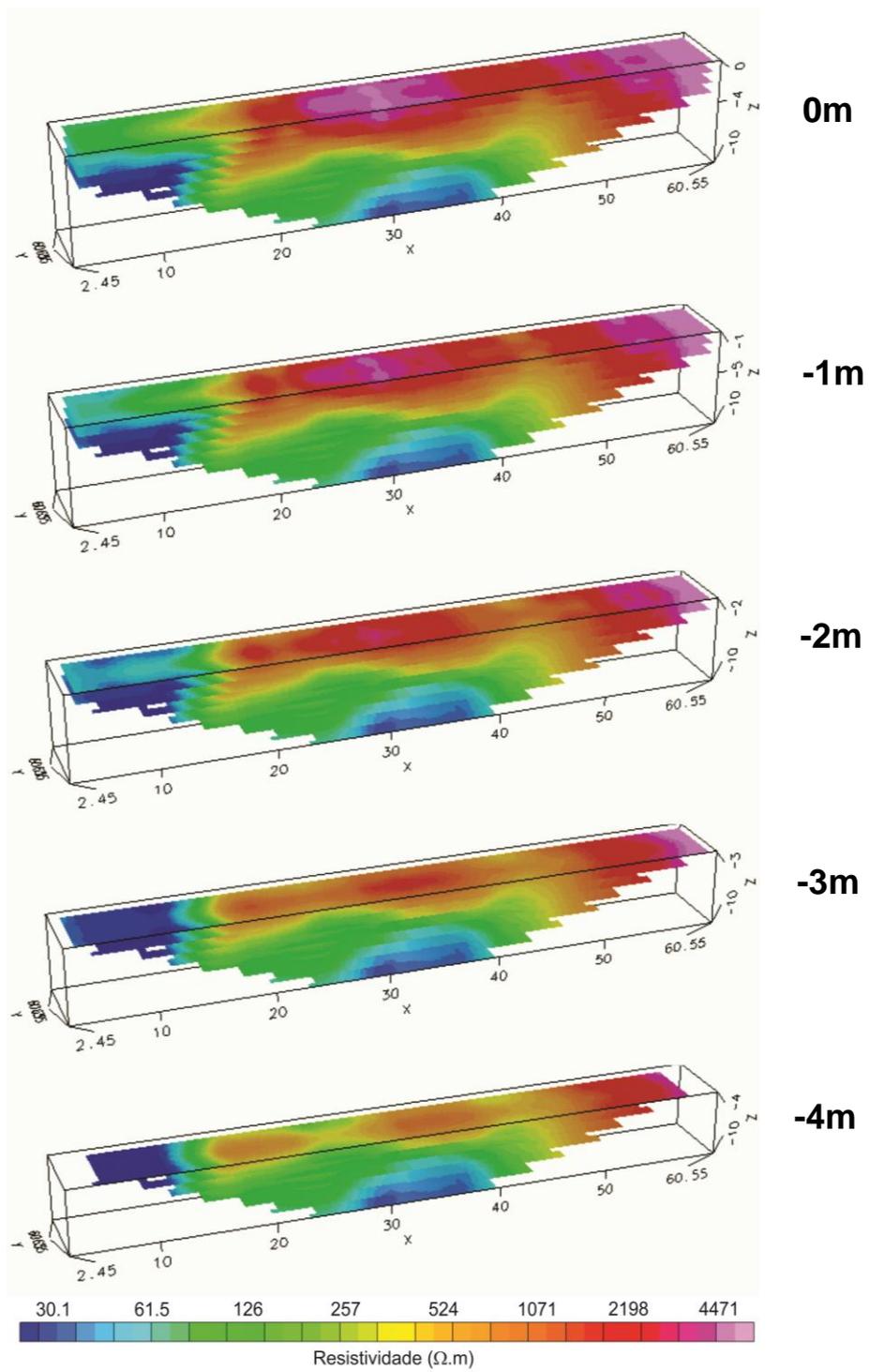
**Figura 6.11:** Modelo de visualização 3D em blocos com as resistividades medida (a) e resistividade modelada (b), com posicionamento dos pontos de ensaio de permeabilidade.



Fonte: Dados de Pesquisa

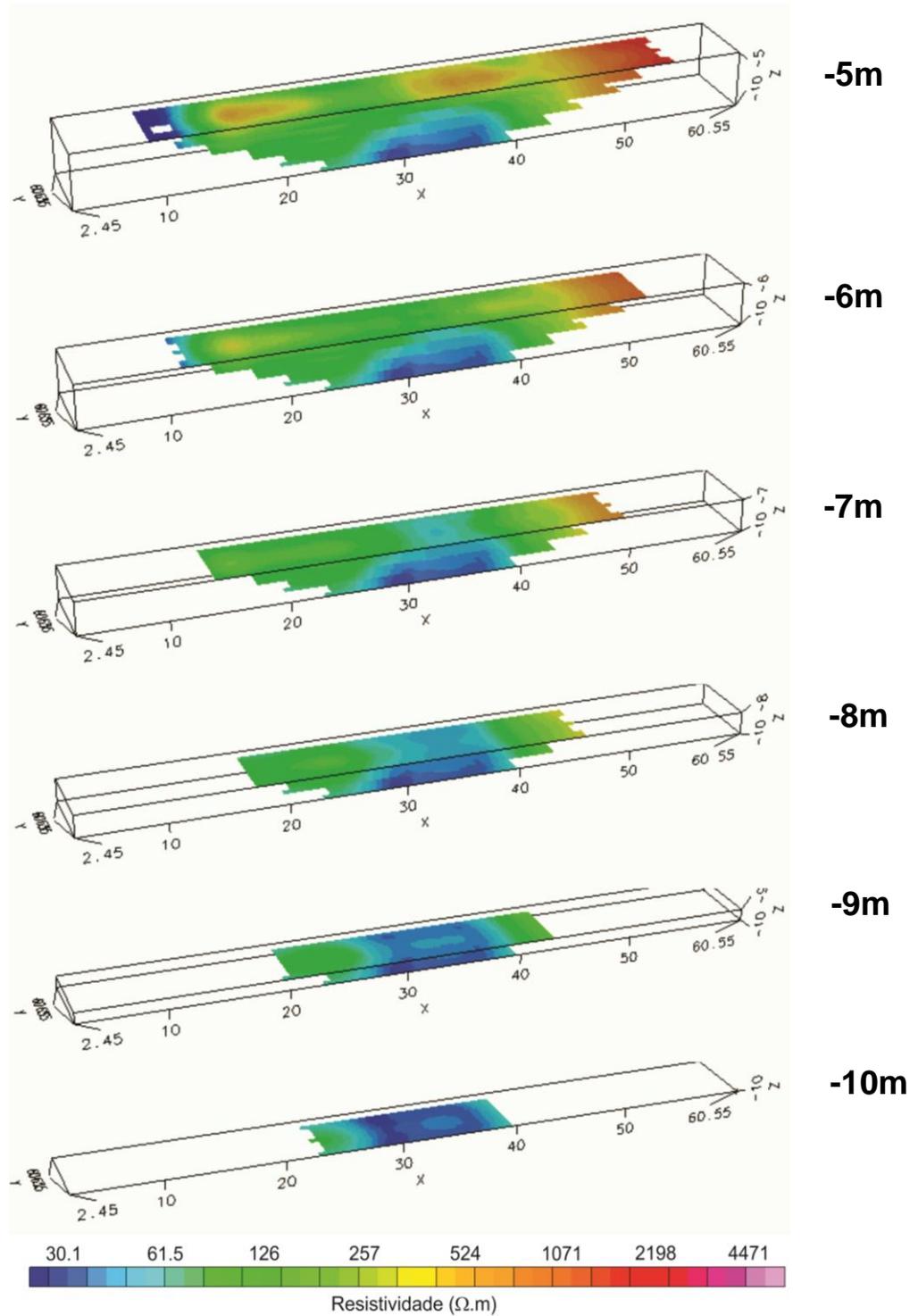
Os dados de resistividade medida do modelo de visualização 3D apresentam tanto as zonas *ZBR-1* e *ZBR-2*, além da zona *ZAR-1*. É possível acompanhar tais zonas nas imagens com os níveis de investigação. As figuras 6.12 e 6.13 apresentam os níveis de investigação do conjunto de resistividade medida, ao passo que as figuras 6.14 e 6.15 apresentam os níveis de investigação do modelo de inversão.

**Figura 6.12:** Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Ipeúna separados por níveis (0 a 4m).



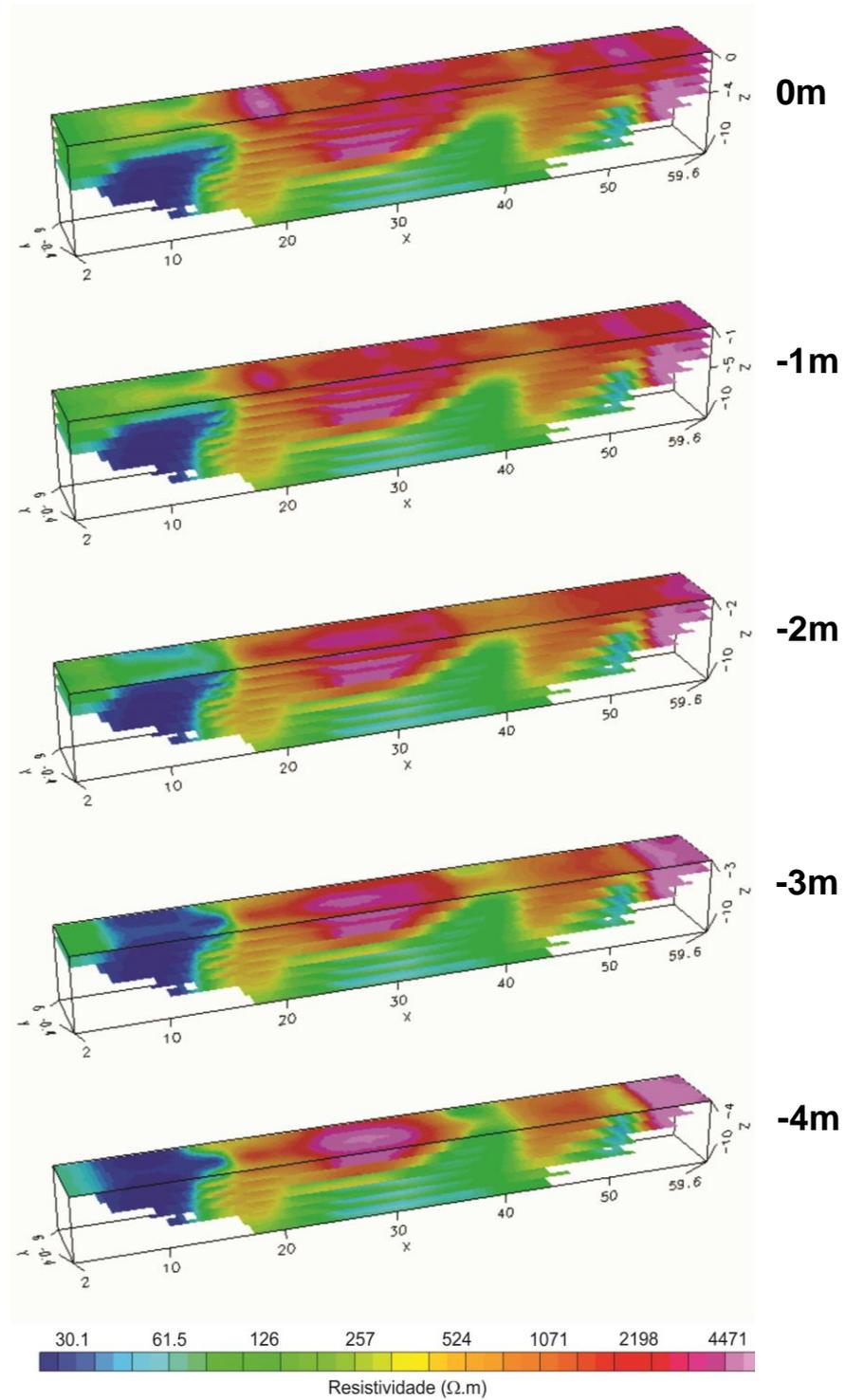
Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.13:** Mapas de nível da resistividade medida da barragem de Ipeúna separados por níveis (5 a 10m).



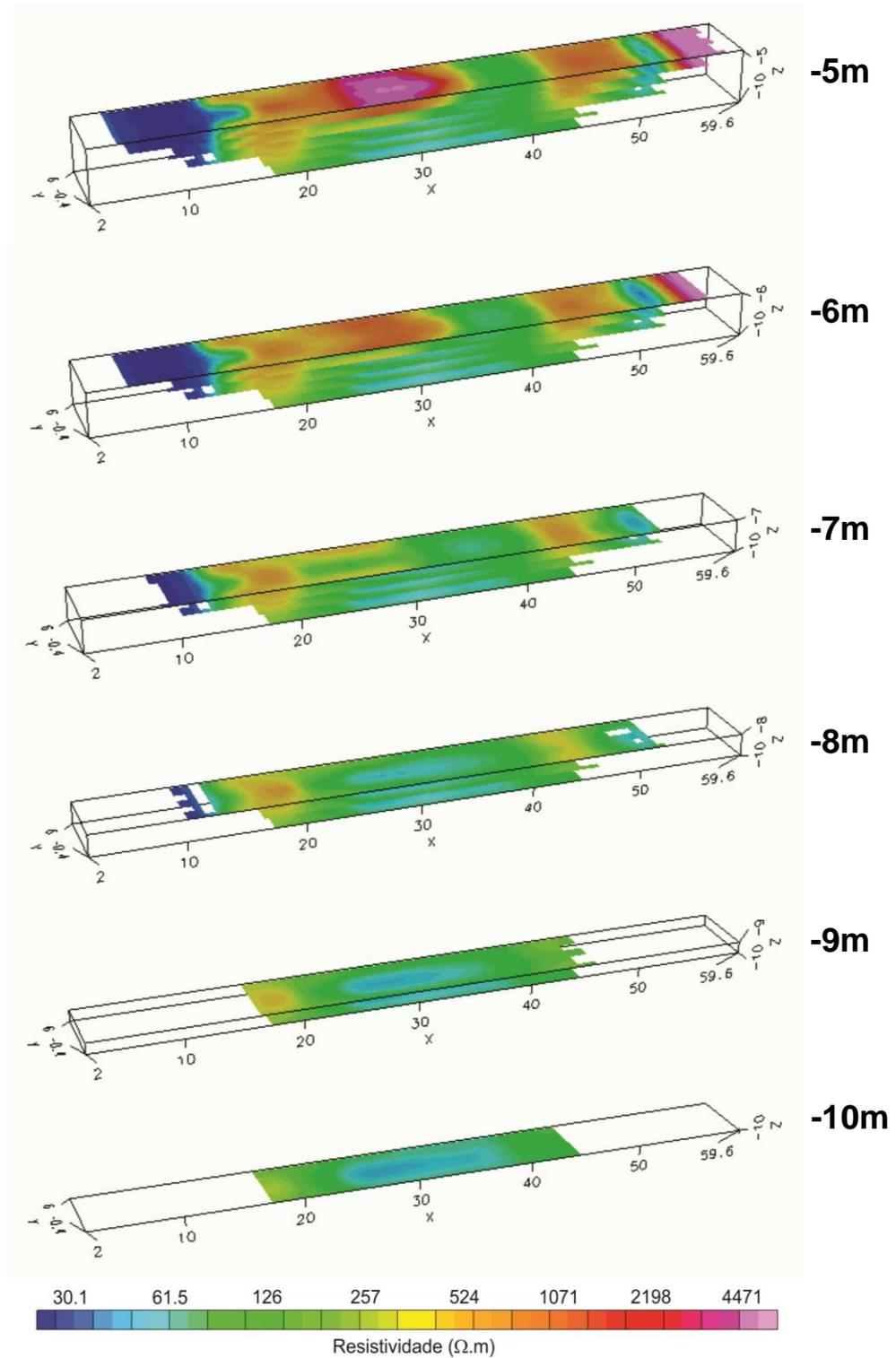
Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.14:** Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Ipeúna separados por níveis (0 a 4m).



Fonte: Dados de Pesquisa

**Figura 6.15:** Mapas de nível da resistividade modelada da barragem de Ipeúna separados por níveis (5 a 10m).



Fonte: Dados de Pesquisa

### 6.2.2 – Resultados dos ensaios Geotécnicos – Barragem de Ipeúna

Os resultados dos ensaios de permeabilidade foram obtidos através do ensaio de campo com o permeâmetro de Guelph e são apresentados na tabela 6.3. Diferentemente da barragem de Cordeirópolis, os ensaios de permeabilidade não apresentaram valores negativos de permeabilidade.

**Tabela 6.3:** Síntese dos resultados de permeabilidade da barragem de Ipeúna a partir do permeâmetro de Guelph.

| Ponto de Ensaio | Valor da permeabilidade (cm/s) |
|-----------------|--------------------------------|
| Ponto 1         | $1,20 \times 10^{-5}$          |
| Ponto 2         | $5,60 \times 10^{-4}$          |
| Ponto 3         | $1,05 \times 10^{-4}$          |
| Ponto 4         | $1,87 \times 10^{-4}$          |

Fonte: Dados de Pesquisa

Os resultados apresentados pelos ensaios de permeabilidade indicam os pontos 2, 3 e 4 com uma ordem de grandeza de  $10^{-4}$  cm/s. O ponto 1 apresentou permeabilidade com uma ordem de grandeza de  $10^{-5}$  cm/s. A síntese dos resultados dos índices físicos é apresentada pela tabela 6.4:

**Tabela 6.4:** Síntese dos resultados dos índices físicos para amostra de solo da barragem de Ipeúna – SP.

| Índice Físico                        | Barragem Ipeúna       |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Teor de umidade                      | 13,68%                |
| Massa Esp. do Solo ( $\rho$ )        | $1,95 \text{ g/cm}^3$ |
| Massa Esp. dos Sólidos ( $\rho_s$ )  | $2,61 \text{ g/cm}^3$ |
| Massa Esp. Seca do Solo ( $\rho_d$ ) | $1,71 \text{ g/cm}^3$ |
| Índice de Vazios ( $e$ )             | 0,52                  |
| Porosidade ( $\eta$ )                | 34,34%                |
| Grau de Saturação ( $S_r$ )          | 68,29%                |

Fonte: Dados de Pesquisa

Os resultados detalhados da análise granulométrica são apresentados através do anexo A que contém os valores específicos do peneiramento com as porcentagens retidas em cada

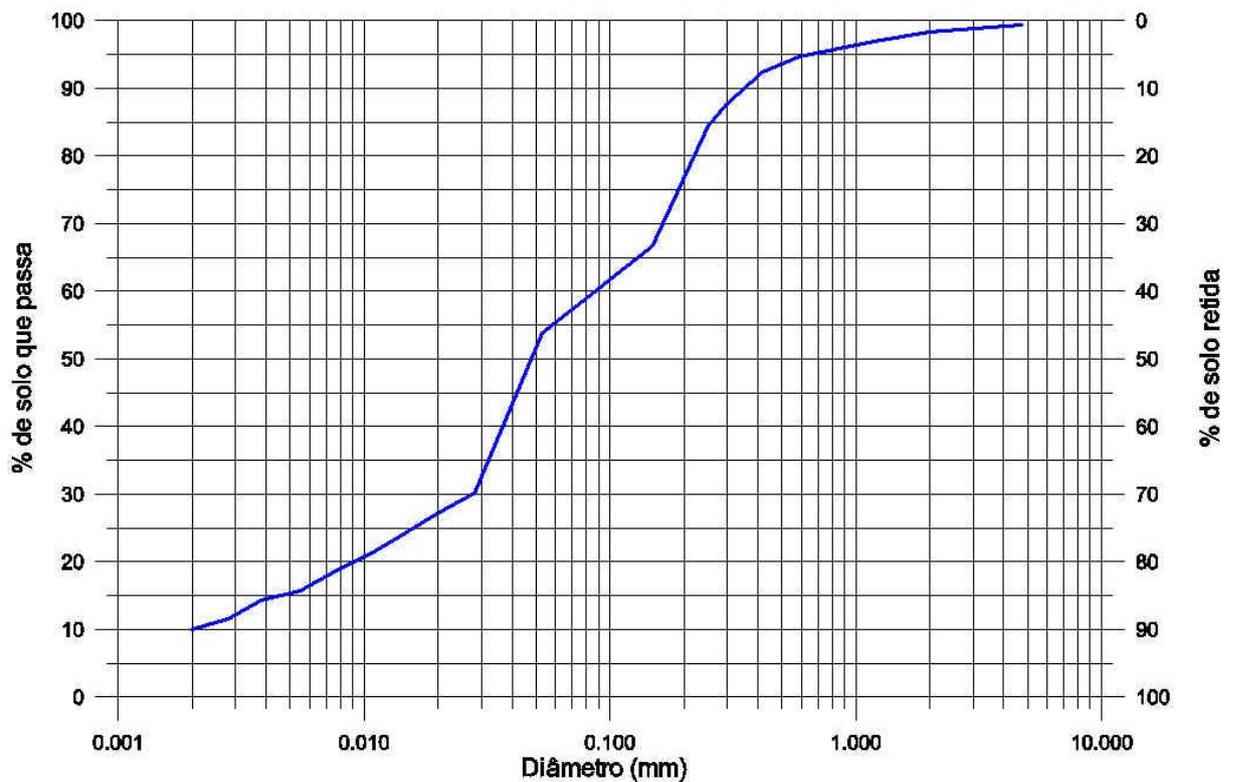
peneira e os resultados da sedimentação de partículas finas. A figura 6.16 apresenta a curva granulométrica do solo.

A partir dos resultados obtidos com o ensaio granulométrico, é possível determinar para o material granular do solo amostrado o Coeficiente de não Uniformidade ( $C_U$ ), expresso na equação 6.3, e Coeficiente de Curvatura ( $C_C$ ) expresso na equação 6.4. Pelo gráfico da curva granulométrica os valores de  $D_{60} = 0,087$ ;  $D_{30} = 0,027$  e  $D_{10} = 0,002$  (valor extrapolado).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0,087}{0,002} = 43,5 \quad (\text{Eq. 6.3})$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0,027^2}{0,002 \cdot 0,087} = 4,1896 \quad (\text{Eq. 6.4})$$

**Figura 6.16:** Curva granulométrica da amostra de solo de Ipeúna.



Fonte: Dados de Pesquisa

## 7 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 7.1 – Barragem de Cordeirópolis

Na barragem de Cordeirópolis, devido a limitações operacionais comentadas, não foi possível realizar o ensaio com o permeâmetro de Guelph na principal zona a ser investigada, no caso a *ZBR-1*, que começa a ocorrer a uma distância média de 3m da superfície. Além disso, não seria prudente perfurar justamente a zona da barragem onde há suspeitas de infiltração de água e possíveis pontos de fraqueza, pois tal ação poderia aumentar os danos à estrutura e até acelerar processos de erosão interna.

Alguns desses fatores que influenciaram os resultados de permeabilidade inviabilizaram a utilização de alguns desses resultados dos ensaios. Na barragem de Cordeirópolis, em dois dos cinco pontos ensaiados foram relatados valores negativos de  $k$ . Esses pontos não foram utilizados para embasar os resultados da geofísica, pois não correspondem ao coeficiente de permeabilidade real.

Possivelmente a mineralogia e a granulometria também são um dos fatores que influenciam diretamente os resultados. Na execução de furos para o ensaio de permeabilidade, foram detectados fragmentos de basalto com diversos graus de alteração (Figura 7.1). Este fator pode ter sido determinante na ocorrência de valores negativos de permeabilidade.

**Figura 7.1:** Fragmentos de rocha alterada via trado manual.



Fonte: Arquivo Pessoal

O modelamento dos dados a partir da geração do modelo de visualização 3D em blocos com valores independentes de resistividade pode omitir valores que pontualmente

apresentam alto contraste com blocos adjacentes, que pode ser atribuído a efeitos da interpolação dos resultados.

As ZBRs 2 e 3 da barragem de Cordeirópolis ocorrem junto à estrutura de concreto do vertedouro. O baixo valor de resistividade é interpretado como um ponto de percolação de água, o que justificaria os baixos valores de resistividade. As ZBRs 2 e 3 ocorrem de forma pontual e há três principais hipóteses para a gênese do problema:

- a) Problemas executivos relacionados a níveis de compactação de solo insuficiente na região de ocorrência das ZBRs 2 e 3.
- b) Possíveis fissuras na estrutura rígida de concreto. Fissuras na estrutura representam pontos de fraqueza que podem criar um caminho preferencial de percolação;
- c) Contraste de propriedades físicas do meio terroso (corpo da barragem) com o concreto do vertedouro. O contraste das velocidades de percolação de água pode acarretar em zonas de percolação, principalmente na ausência de cuidados da estanqueidade do contato entre concreto e solo.

Os valores de resistividade de tais zonas são menores a jusante. Fato que contribui para um tipo de erosão que ocorre de jusante para montante, que de fato pode ser interpretado como um *piping*.

A ZBR-1 na barragem de Cordeirópolis é a zona mais visível nas imagens geofísicas. A intensidade e tamanho da zona são maiores a montante do que a jusante. Ela também é interpretada como uma zona saturada e de possível caminho preferencial de fluxo na estrutura da barragem. Um dos mecanismos que pode ter levado a formação de tal zona pode ter sido uma camada de solo que não tenha atingido o grau de compactação desejado, e pode dar origem a um estrato onde a permeabilidade horizontal é maior que a permeabilidade vertical –  $k_h > k_v$ , o que justificaria tal infiltração.

De fato, essa zona é menor a jusante, o que inicialmente não representa a formação de um *piping* desenvolvido, uma vez que a formação de tal fenômeno é determinada pela erosão interna que ocorre de jusante para montante a partir do carreamento de partículas. Se o *piping* no local fosse de maiores dimensões, com uma cavidade grande por onde houvesse água percolando na base e vazios na porção superior do tubo, esses vazios no tubo deveriam ser registrados nos dados de geofísica como uma zona de alta resistividade.

Os valores de baixa resistividade bem como a área da zona são notadamente maiores a montante. Tal fato pode justificar a instalação do início do processo de *piping* da ZBR-1 pois, no estágio inicial do canal de fluxo hídrico, é comum que ocorra zonas de maior concentração

a montante e, maior pressão a jusante, pois com a diminuição da área da seção do canal, a pressão hidrostática local tende a aumentar.

Os dados de permeabilidade aproveitados nos ensaios – no caso os pontos 1, 3 e 5 – sugerem valores da ordem de grandeza de  $k$  de  $10^{-5}$  cm/s; o que representa valores relativamente muito baixos, mas esperados para o tipo de solo do aterro do corpo da barragem. Os resultados dos ensaios dos índices físicos do solo também foram compatíveis com resultados esperados para o tipo de solo laterítico da barragem. Alguns resultados chamaram a atenção, como o valor relativamente elevado da massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) = 2,91g/cm<sup>3</sup>.

O fato do valor elevado da massa específica dos sólidos é justificado pelo solo ser produto de alteração das rochas básicas da Fm. Serra Geral, com mineralogia do solo rica em hematita, mineral com alta densidade relativa. Os resultados da massa específica dos sólidos também influenciam os valores de índice de vazios ( $e$ ) e porosidade ( $n$ ) – 0,87 e 46,50%. Esses índices também podem ter sido influenciados pela profundidade de amostragem do solo, uma vez que foram coletados a uma profundidade média de aproximadamente 0,50m. Provavelmente esses índices seriam menores em maiores profundidades devido ao maior nível de compactação do solo.

Os resultados da análise granulométrica forneceram um Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) de 43. O Coeficiente de Uniformidade é um parâmetro que mede a inclinação média da curva e identifica se o solo possui uniformidade ou não. O valor de  $C_u$  muito superior a 3 indica um solo não uniforme. O Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ) no valor de 6,72 indica que o solo da barragem não é bem graduado.

## **7.2 – Barragem de Ipeúna**

Os dados geofísicos da barragem de Ipeúna apresentaram tanto zonas de baixa resistividade quanto de alta resistividade. As linhas de imageamento elétrico, imagens 2D, apresentaram boa resolução das zonas de contraste e a partir da análise minuciosa, é possível observar a evolução das zonas de alta e baixa resistividade de jusante para montante. A *ZAR-1*, localizada no centro da imagem pode ser interpretada como uma zona de solo mais argilosa e homogênea do aterro do corpo da barragem ou possivelmente blocos de granito, descritos em afloramentos na área de empréstimo da barragem fruto da heterogeneidade do aterro.

A *ZBR-2* localizada na porção central da imagem pode ser considerada uma zona de infiltração de água. O fato da *ZBR-2* aumentar no sentido de jusante pode indicar o processo

de *piping* instalado no corpo da barragem. Este fato poderia ser comprovado na face da barragem, mas diante das dificuldades de acesso, não foi possível uma inspeção adequada da face de barragem.

A *ZBR-1* que ocorre na lateral esquerda da barragem pode ser interpretada como uma zona saturada do aterro da barragem. Tal zona possivelmente foi influenciada pela erosão de montante para jusante. As imagens 3D da barragem de Ipeúna não apresentam a evolução das zonas de contraste de resistividade com tanta clareza de valores. Mas é possível visualizar uma tendência de evolução das zonas de montante para jusante.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade apresentaram os pontos 2, 3 e 4 com uma ordem de grandeza de  $10^{-4}$  cm/s, e apenas o ponto 1 com ordem de grandeza  $10^{-5}$  cm/s. No local de amostragem do ponto 1, há uma árvore de médio porte, onde as raízes da planta podem aumentar o grau de saturação do local, que por sua vez pode influenciar os valores mais baixos de permeabilidade. Mas em geral é possível considerar que o valor de permeabilidade predominante no aterro do corpo da barragem é  $10^{-4}$  cm/s.

Os valores dos índices físicos das amostras apresentaram coerência com o tipo de solo do aterro. A análise granulométrica também indicou um solo mais arenoso do que a barragem de Cordeirópolis. O valor do Coeficiente de Uniformidade  $C_U$  de 43,5 indica um solo não uniforme, e o Coeficiente de Curvatura de 4,19 também indica um solo mal graduado.

### **7.3 – Comparativo entre resultados das barragens de Cordeirópolis e Ipeúna**

A despeito do contraste entre propriedades físicas entre as barragens de Ipeúna e Cordeirópolis é possível citar alguns fatores que contribuem para tais resultados. *A priori*, a geologia deve ser considerada. Os materiais de empréstimo das barragens foram possivelmente transportados de locais próximos à própria barragem. Isso significa que a barragem de Cordeirópolis foi composta basicamente com solos argilosos lateríticos, provenientes da alteração de rochas básicas da Formação Serra Geral. Ao passo que o material da barragem de Ipeúna é composto por solos e rochas arenosos do Grupo Itararé.

Essa diferença desencadeia outros fatores que influenciam o comportamento da estrutura e os resultados dos métodos investigados. Mineralogia, granulometria, grau de saturação, índice de vazios são alguns desses fatores que justificam em parte o contraste de propriedades das barragens estudadas. Além de outros fatores técnicos, como os projetos empregados, os procedimentos executivos adotados, a idade das barragens e o nível de inspeção.

Os dados do ensaio de granulometria apresentaram valores esperados com análise visual de campo. O solo da barragem de Ipeúna possui maior porção arenosa (partículas com diâmetro  $>0,06\text{mm}$ ) – cerca de 45%, ao passo que o solo de Cordeirópolis apenas 28% de porção arenosa.

Com uma diferença notável no ensaio de granulometria e com uma geologia diferente, era de se esperar que os índices físicos também apresentassem diferenças. A tabela 7.1 apresenta um comparativo entre os resultados dos ensaios.

**Tabela 7.1:** Comparativo entre os resultados dos índices físicos das duas barragens.

| Índice Físico                        | Barragem Cordeirópolis | Barragem Ipeúna        |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Teor de umidade                      | 11,78%                 | 13,68%                 |
| Massa Esp. do Solo ( $\rho$ )        | 1,74 g/cm <sup>3</sup> | 1,95 g/cm <sup>3</sup> |
| Massa Esp. dos Sólidos ( $\rho_s$ )  | 2,91 g/cm <sup>3</sup> | 2,61 g/cm <sup>3</sup> |
| Massa Esp. Seca do Solo ( $\rho_d$ ) | 1,56 g/cm <sup>3</sup> | 1,71 g/cm <sup>3</sup> |
| Índice de Vazios ( $e$ )             | 0,87                   | 0,52                   |
| Porosidade ( $n$ )                   | 46,50%                 | 34,34%                 |
| Grau de Saturação ( $S_r$ )          | 39,45%                 | 68,29%                 |

Fonte: Dados de Pesquisa

Os resultados dos índices físicos agregam dados coerentes com a granulometria e a geologia local. Os teores de umidade das duas amostras são relativamente parecidos. A massa específica do solo em Ipeúna é maior do que a de Cordeirópolis provavelmente devido ao grau de saturação das amostras, que em Ipeúna é muito mais elevado. O fato do grau de saturação ser maior em Ipeúna mostra coerência com os dados de granulometria e a porção arenosa maior do solo local. Por outro lado, tanto o índice de vazios quanto a porosidade são maiores em Cordeirópolis devido à mineralogia dos solos. A massa específica dos sólidos de Cordeirópolis é aproximadamente 10% maior devido à presença do mineral de hematita, presente nos basaltos da Fm. Serra Geral, determinantes na porosidade e índice de vazios.

Os dados de permeabilidade também são coerentes com os dados de granulometria das amostras. Em geral, a ordem de grandeza de  $k$  em Ipeúna é de  $10^{-4}$  cm/s ao passo que em Cordeirópolis é  $10^{-5}$  cm/s.

## 8 – CONCLUSÕES

A integração dos dados obtidos através de métodos diretos com dados obtidos através de métodos indiretos agregou maior credibilidade aos resultados. No caso do presente estudo, os dados quantitativos dos ensaios de permeabilidade e índices físicos do solo fornecem embasamento às análises dos dados qualitativos da geofísica. Porém, nem todos os resultados foram totalmente coerentes. Isso pode ser atribuído a fatores que influenciam os valores dos métodos de resistividade elétrica e de permeabilidade.

No caso do método da eletrorresistividade, fatores como a mineralogia e o grau de saturação do solo exercem influência nos valores. Houve limitações para o ensaio de permeabilidade. A partir dos dados de geofísica, o ideal seria executar ensaios de permeabilidade nas zonas com maiores amplitudes dos valores de resistividade. Isso não foi possível devido à dificuldade de perfuração superior a um metro, via trado manual.

Os ensaios de permeabilidade foram fundamentais para a compreensão da cinemática hídrica nos solos, com metodologia executiva de ensaio simples e confiável. Os ensaios de índices físicos do solo e a análise granulométrica fornecem base para maior compreensão dos resultados geoeletricos e para discussão dos resultados.

O permeâmetro de Guelph possuiu limitações nos ensaios realizados no estudo, principalmente pelas heterogeneidades do meio e pelo alto teor de finos dos solos amostrados. Provavelmente em solos com maior porção grossa de partículas os resultados seriam mais satisfatórios. Porém, é preciso considerar as vantagens do ensaio com o permeâmetro de Guelph como a facilidade de manuseio do equipamento, rápida obtenção de resultados e a utilização de pouca água para a realização do ensaio.

A aplicação do método da eletrorresistividade resultou em dados satisfatórios. Os modelos de inversão foram importantes para o entendimento de tendências de fluxo hídrico dinâmico, embora este processamento atenuasse áreas relevantes e identificáveis nos dados de resistividade elétrica medido. Nesse contexto, é preciso salientar a importância da análise integrada dos dados de resistividade elétrica medidos e modelados. A configuração do *software* de tratamento dos resultados pode ajudar na análise.

Apesar dos dados geofísicos apresentarem zonas de percolação e possivelmente infiltração de água, não é possível afirmar que a estrutura corre risco iminente de ruptura ou instabilidade. Não há indícios evidentes de degradação considerável na barragem e os dados de permeabilidade sugerem que o coeficiente de permeabilidade do solo da barragem de Cordeirópolis é tão baixo no corpo da barragem que, provavelmente a formação e

desenvolvimento de um possível *piping* nas *ZBRs* demoraria aparentemente anos e, talvez décadas para ocorrer de uma maneira efetiva que pudesse representar algum risco estrutural ao corpo da barragem.

Portanto, apesar do método da eletrorresistividade ter apresentado valores considerados satisfatórios com a proposta do estudo, não deve ser empregada como fator decisivo da estabilidade de barragens de terra nem como parâmetro de iminência de rompimento da estrutura. O método demonstrou ser um importante aliado da instrumentação geotécnica tradicional, que visa o acompanhamento através de instrumentos como piezômetros, marcos superficiais, marcos refletivos, inclinômetros, clinômetros entre outros. Esses instrumentos convencionais podem determinar a movimentação e o nível de deformabilidade da estrutura. Os limites críticos de estabilidade e deformabilidade do empreendimento podem ser dimensionados a partir de *softwares* especializados ou em cálculos gerados no projeto executivo.

Contudo a geofísica obteve resultados satisfatórios para os fins desejados e cumpriu o objetivo de uma ferramenta de identificação de possíveis zonas de infiltração de água, e pode ser empregada com a finalidade de analisar a evolução do fenômeno de *piping* em barramentos de terra. A utilização de outros métodos geoeletricos e geofísicos (como a sísmica) podem auxiliar no diagnóstico de possíveis patologias de estruturas e agregam maior credibilidade aos resultados. Nesse contexto, a geofísica representa uma importante e valiosa ferramenta de auxílio em remediações de corpos de barragens de terra e manutenção de estruturas do corpo de barragem.

## REFERÊNCIAS

ABEM, **Instruction Manual Terrameter LS**, Suécia, 122f. 2012.

ABNT. **NBR 07181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13f.

AL-FARES, W. Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria. **Journal of Applied Geophysics**, v. 75, p. 464–471, 2011.

ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. Oficina de Textos, 2007.

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

BEDROSIAN, P. A., BURTON, B. L., POWERS, M. H., MINSLEY, B. J. Geophysical investigations of geology and structure at the Mathis Creek Dam, Truckee, California. **Journal of Applied Geophysics**, v. 77, p.7-20, 2012.

BRACK, I. V. **30 anos da morte da Sete Quedas**. Rio Uruguai Vivo. Disponível em: <<https://riouruguaiativo.wordpress.com/2012/04/09/30-anos-da-morte-das-sete-quedas/>>. Acesso em: 02 abr. 2015.

CASE, J. S. **Inspection of earthen embankment dams using time lapse electrical resistivity tomography**. 2012. 123f. Tese (Mestrado em Ciências) – Department of Civil Engineering, The University of Mississippi.2012.

CETESB. **Água Subterrânea e Poços Tubulares**. 3. Ed. São Paulo 1978

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

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

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 6. Ed. Sacramento: Editora Thomson, 2006.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. 2007. 234f. Tese (Doutorado em Recursos minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

GOOGLE MAPS. [Localização da área de estudo]. 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso em: 02 abr. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física: Volume 3 Eletromagnetismo**. 8 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

HEAD, K. **Manual of Soil Laboratory Testing**. 2. Ed. Londres: Editora Pentech, 1981.

IBAMA. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/publicadas/onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1469-hectares-de-terras>>. Acesso em 14/12/2015.

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

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

KEAREY, P; BROOKS, M; HILL, I. **Geofísica de Exploração**, 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.J. **Environmental Geology – Handbook of fields methods and case studies**. [s.l.]. Springer, 2007.

LAMBE, T. W.; WHITEMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1969

LANDIM, P. M. B. **O Grupo Passa Dois na Bacia do Rio Corumbataí (SP)**. 1967 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Faculdade de Filosofia de Ciências e Letras, Rio Claro, 1967.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o Permeômetro Guelph e ensaios de laboratório**. 2005. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**, 2. Ed.[s.l.]. Cambridge University Press, 2007.

MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A. C. O.; ELIS, V. R.; DOURADO, J. C. Estudos de Minibarragens: Exemplo de Aplicação de Técnicas Geofísicas. **Geociências** (São Paulo), Ed. Unesp – São Paulo, v. 18, n.01, p. 53-67, 1999.

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

McNEILL, J. D. **Electrical conductivity of soils and rocks**. [s.l.]. Geonics Limited. Technical Note TN-5. 1980. 22pp.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. & FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

MINSLEY, B. J.; BURTON, B. L.; IKARD, S.; POWERS, M. H. **Geophysical investigations at Hidden Dam, Raymond, California: Summary of fieldwork and data analysis**. 2011. Open File Report 2010-2013. United States Geological Survey. 2011.

MOREIRA, C. A.; PEREIRA, A. M.; CAVALHEIRO, M. L. D. Caracterização geolétrica do gabro Santa Catarina, São Sepé (RS). **Revista Pesquisa em Geociências**, Porto Alegre, v. 41, n. 1, p.15-23, Jan. 2014.

NARDY, A. J. R. *et al.* Aspectos geológicos e estratigráficos das rochas vulcânicas ácidas do Membro Chapecó. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1, 1999, São Pedro. **Resumos...** São Pedro: SBG, 1999. P. 68.

- NOBES, D. C. Troubled waters: environmental applications of electrical and electromagnetic methods. **Surveys in Geophysics**, v. 17, p. 393-454, 1996.
- NOGUEIRA, J. P. **Mecânica dos Solos** – Ensaio de laboratório. 2. Ed. São Carlos: Universidade de São Paulo. 2005.
- PASCHOALIN FILHO, J. A. **Utilização de solo residual de diabásio como elemento de fundação e material de construção de aterros compactados para barragens de pequeno porte**. 2002. 171f. Dissertação (Mestrado em Construções), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2002.
- 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.
- PIRES, F. A. **Análise Paleoambiental e estratigráfica do Subgrupo Itararé na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo**. 2001. 113f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.
- RICCOMINI, C. **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e área vizinhas**. 1995. 100f. (Livre Docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995
- SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28. 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. V.1, p. 41-65.
- SILVA, G.M.P. **Diagnóstico Ambiental, Qualidade de Água e Índice de Depuração do Rio Corumbataí – SP**. 1999, 155f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos Ambientais – CEA, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- 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.
- SOUZA, M. M. **Estudo para projeto geotécnico da barragem de Alto Irani**. 2013. 129f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2. Ed. Cambridge University Press, 1990.
- WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. **Investigations in Geophysics**, n 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, v. 1, p. 147-198, 1990.
- ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T. Bacia do Paraná. In: ORIGEM E EVOLUÇÃO DE BACIAS

SEDIMENTARES. **Am. Ass. Petrol. Geol. Mem.** Petrobrás, Rio de Janeiro, p. 135-164, 1990.

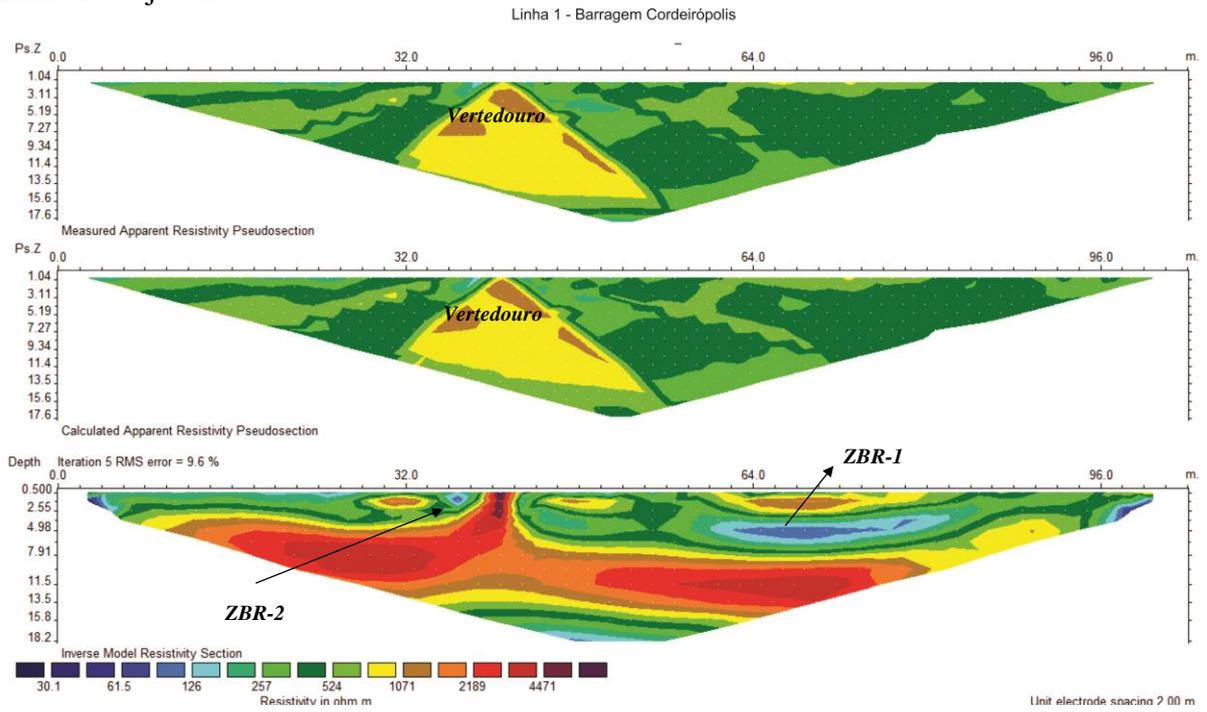
**ANEXO A – PLANILHA COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS**

| UNESP - Campus de Rio Claro                                  |                   |             |                            |                                                |                                                  |
|--------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Departamento de Geologia Aplicada - Laboratório de Geotecnia |                   |             |                            |                                                |                                                  |
| ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA                              |                   |             |                            |                                                |                                                  |
|                                                              |                   |             | Local : Cordeirópolis - SP |                                                |                                                  |
|                                                              |                   |             | Profundidade : 0,50 mt     |                                                |                                                  |
| Massa específica dos sólidos ( $\rho$ ) : g/cm <sup>3</sup>  |                   | <b>2,91</b> |                            |                                                |                                                  |
| Determinação do teor de umidade do solo                      |                   |             |                            | DETERMINAÇÕES                                  |                                                  |
| Recepiente nº :                                              |                   |             |                            | Defloculante<br>Hexametáfosfato N <sub>a</sub> |                                                  |
| Sólidos+Tara+Água :                                          | g                 |             |                            | Proveta nº :                                   |                                                  |
| Sólidos+Tara :                                               | g                 |             |                            | Densímetro :                                   |                                                  |
| Tara :                                                       | g                 |             |                            | Massa de solo úmido (g)                        |                                                  |
| Massa d'água :                                               | g                 | 0           | 0                          | 0                                              | <b>78,00</b>                                     |
| Massa de sólidos :                                           | g                 | 0,00        | 0,00                       | 0                                              |                                                  |
| Teor de umidade :                                            | %                 | 0,00        | 0,00                       | 0,00                                           | Massa de solo seco (g)                           |
| Média dos teores de umidade :                                | %                 | <b>0,00</b> |                            |                                                | <b>78,00</b>                                     |
| PENEIRAMENTO                                                 |                   |             |                            | APÓS ENSAIO                                    |                                                  |
| #                                                            | Abert. (mm)       | Peso (g)    | % Retida                   | %Ret.Ac.                                       |                                                  |
| <b>4</b>                                                     | <b>4,76</b>       | 0,31        | 0,40                       | 0,40                                           | Massa retida # 100 (g)<br>16,68                  |
| <b>10</b>                                                    | <b>2,00</b>       | 0,36        | 0,46                       | 0,86                                           | Massa ret. # 200 e 270 (g)<br>6,7                |
| <b>16</b>                                                    | <b>1,19</b>       | 0,73        | 0,94                       | 1,79                                           | Massa retida no prato (g)<br>0,16                |
| <b>30</b>                                                    | <b>0,59</b>       | 3,31        | 4,24                       | 6,04                                           | Massa retida de finos<br>na proveta (g)<br>54,46 |
| <b>40</b>                                                    | <b>0,42</b>       | 2,46        | 3,15                       | 9,19                                           |                                                  |
| <b>50</b>                                                    | <b>0,297</b>      | 2,77        | 3,55                       | 12,74                                          |                                                  |
| <b>60</b>                                                    | <b>0,25</b>       | 1,16        | 1,49                       | 14,23                                          |                                                  |
| <b>100</b>                                                   | <b>0,149</b>      | 5,58        | 7,15                       | 21,38                                          |                                                  |
| <b>200</b>                                                   | <b>0,074</b>      | 5,44        | 6,97                       | 28,36                                          |                                                  |
| <b>270</b>                                                   | <b>0,053</b>      | 1,26        | 1,62                       | 29,97                                          | Massa de sólidos final (g)<br>78,00              |
| Prato/Proveta                                                | <b>&lt; 0,053</b> | 54,62       | 70,03                      | 100,00                                         |                                                  |
| SEDIMENTAÇÃO                                                 |                   |             |                            |                                                |                                                  |
| Tempo após agitar : min                                      | <b>0</b>          | <b>2</b>    | <b>4</b>                   | <b>8</b>                                       | <b>15</b>                                        |
| Leitura do densímetro                                        | agitar            | 23,0        | 21                         | 19,0                                           | 17,0                                             |
| Temperatura : °C                                             | ◇                 | 22,5        | 22,5                       | 22,5                                           | 22,5                                             |
| Correção da temperatura                                      | ◇                 | 5           | 5                          | 5                                              | 5                                                |
| Leitura corrigida :                                          | ◇                 | 18,0        | 16,0                       | 14,0                                           | 12,0                                             |
| Altura de queda : cm                                         | ◇                 | 13,1        | 13,5                       | 13,8                                           | 14,2                                             |
| Viscosidade da água :                                        | ◇                 | 6,7         | 6,7                        | 6,7                                            | 6,7                                              |
| Massa esp.da água : g/cm <sup>3</sup>                        | ◇                 | 0,9974      | 0,9974                     | 0,9974                                         | 0,9974                                           |
| Diâmetro da partícula : mm                                   | ◇                 | 0,026       | 0,019                      | 0,014                                          | 0,010                                            |
| Porcentagem que passa : %                                    | ◇                 | 35,16       | 31,25                      | 27,35                                          | 23,44                                            |
| Tempo após agitar : min                                      | <b>30</b>         | <b>60</b>   | <b>120</b>                 | <b>240</b>                                     | <b>480</b>                                       |
| Leitura do densímetro                                        | 16                | 14          | 13,0                       | 13,0                                           | 12,0                                             |
| Temperatura : °C                                             | 22,5              | 22,5        | 22,5                       | 22,5                                           | 22,5                                             |
| Correção da temperatura                                      | 5                 | 5           | 5                          | 5                                              | 5                                                |
| Leitura corrigida :                                          | 11,0              | 9,0         | 8,0                        | 8,0                                            | 7,0                                              |
| Altura de queda : cm                                         | 14,4              | 14,8        | 15                         | 14,8                                           | 15                                               |
| Viscosidade da água :                                        | 6,70              | 6,70        | 6,70                       | 6,70                                           | 6,70                                             |
| Massa esp.da água : g/cm <sup>3</sup>                        | 0,9974            | 0,9974      | 0,9974                     | 0,9974                                         | 0,9974                                           |
| Diâmetro da partícula : mm                                   | 0,0072            | 0,0051      | 0,0035                     | 0,0026                                         | 0,0018                                           |
| Porcentagem que passa : %                                    | 21,49             | 17,58       | 15,63                      | 15,63                                          | 13,67                                            |

| UNESP - Campus de Rio Claro                                  |             |          |                        |                                                 |                            |        |
|--------------------------------------------------------------|-------------|----------|------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|--------|
| Departamento de Geologia Aplicada - Laboratório de Geotecnia |             |          |                        |                                                 |                            |        |
| ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA                              |             |          |                        |                                                 |                            |        |
|                                                              |             |          | Local : Ipeúna - SP    |                                                 |                            |        |
|                                                              |             |          | Profundidade : 0,50 mt |                                                 |                            |        |
| Massa específica dos sólidos ( $\rho$ ) : g/cm <sup>3</sup>  |             | 2,61     |                        |                                                 |                            |        |
| Determinação do teor de umidade do solo                      |             |          |                        | DETERMINAÇÕES                                   |                            |        |
| Recepiente nº :                                              |             |          |                        | Defloculante<br>Hexametáfosfato Na <sub>6</sub> |                            |        |
| Sólidos+Tara+Água :                                          | g           |          |                        | Proveta nº : 01                                 |                            |        |
| Sólidos+Tara :                                               | g           |          |                        | Densímetro : incolor                            |                            |        |
| Tara :                                                       | g           |          |                        | Massa de solo úmido (g)                         |                            |        |
| Massa d'água :                                               | g           | 0        | 0                      | 113,00                                          |                            |        |
| Massa de sólidos :                                           | g           | 0,00     | 0,00                   | 0                                               |                            |        |
| Teor de umidade :                                            | %           | 0,00     | 0,00                   | Massa de solo seco (g)                          |                            |        |
| Média dos teores de umidade :                                | %           | 0,00     |                        | 113,00                                          |                            |        |
| PENEIRAMENTO                                                 |             |          |                        | APÓS ENSAIO                                     |                            |        |
| #                                                            | Abert. (mm) | Peso (g) | % Retida               | %Ret.Ac.                                        |                            |        |
| 4                                                            | 4,76        | 0,70     | 0,62                   | 0,62                                            | Massa retida # 100 (g)     |        |
| 10                                                           | 2,00        | 1,28     | 1,13                   | 1,75                                            | 37,72                      |        |
| 16                                                           | 1,19        | 1,50     | 1,33                   | 3,08                                            | Massa ret. # 200 e 270 (g) |        |
| 30                                                           | 0,59        | 2,48     | 2,19                   | 5,27                                            | 14,56                      |        |
| 40                                                           | 0,42        | 2,53     | 2,24                   | 7,51                                            | Massa retida no prato (g)  |        |
| 50                                                           | 0,297       | 5,65     | 5,00                   | 12,51                                           | 0,72                       |        |
| 60                                                           | 0,25        | 3,56     | 3,15                   | 15,66                                           | Massa retida de finos      |        |
| 100                                                          | 0,149       | 20,02    | 17,72                  | 33,38                                           | na proveta (g)             |        |
| 200                                                          | 0,074       | 12,24    | 10,83                  | 44,21                                           | 60,00                      |        |
| 270                                                          | 0,053       | 2,32     | 2,05                   | 46,27                                           | Massa de sólidos final (g) |        |
| Prato/Proveta                                                | < 0,053     | 60,72    | 53,73                  | 100,00                                          | 113,00                     |        |
| SEDIMENTAÇÃO                                                 |             |          |                        |                                                 |                            |        |
| Tempo após agitar : min                                      |             | 0        | 2                      | 4                                               | 8                          | 15     |
| Leitura do densímetro                                        | agitar      |          | 26,0                   | 24                                              | 22,0                       | 20,0   |
| Temperatura : °C                                             |             | ◇        | 22,5                   | 22,5                                            | 22,5                       | 22,0   |
| Correção da temperatura                                      |             | ◇        | 5                      | 5                                               | 5                          | 5      |
| Leitura corrigida :                                          |             | ◇        | 21,0                   | 19,0                                            | 17,0                       | 15,0   |
| Altura de queda : cm                                         |             | ◇        | 12,5                   | 12,9                                            | 13,3                       | 13,6   |
| Viscosidade da água :                                        |             | ◇        | 6,7                    | 6,7                                             | 6,7                        | 6,7    |
| Massa esp.da água : g/cm <sup>3</sup>                        |             | ◇        | 0,9974                 | 0,9974                                          | 0,9974                     | 0,9974 |
| Diâmetro da partícula : mm                                   |             | ◇        | 0,028                  | 0,020                                           | 0,015                      | 0,011  |
| Porcentagem que passa : %                                    |             | ◇        | 30,13                  | 27,26                                           | 24,39                      | 21,52  |
| Tempo após agitar : min                                      |             | 30       | 60                     | 120                                             | 240                        | 480    |
| Leitura do densímetro                                        |             | 18       | 16                     | 15,0                                            | 13,0                       | 12,0   |
| Temperatura : °C                                             |             | 22,0     | 22,0                   | 22,0                                            | 22,0                       | 22,0   |
| Correção da temperatura                                      |             | 5        | 5                      | 5                                               | 5                          | 5      |
| Leitura corrigida :                                          |             | 13,0     | 11,0                   | 10,0                                            | 8,0                        | 7,0    |
| Altura de queda : cm                                         |             | 14,0     | 14,4                   | 14,6                                            | 14,9                       | 15,2   |
| Viscosidade da água :                                        |             | 6,70     | 6,70                   | 6,70                                            | 6,70                       | 6,70   |
| Massa esp.da água : g/cm <sup>3</sup>                        |             | 0,9974   | 0,9974                 | 0,9974                                          | 0,9974                     | 0,9974 |
| Diâmetro da partícula : mm                                   |             | 0,0077   | 0,0055                 | 0,0038                                          | 0,0028                     | 0,0020 |
| Porcentagem que passa : %                                    |             | 18,65    | 15,78                  | 14,35                                           | 11,48                      | 10,04  |

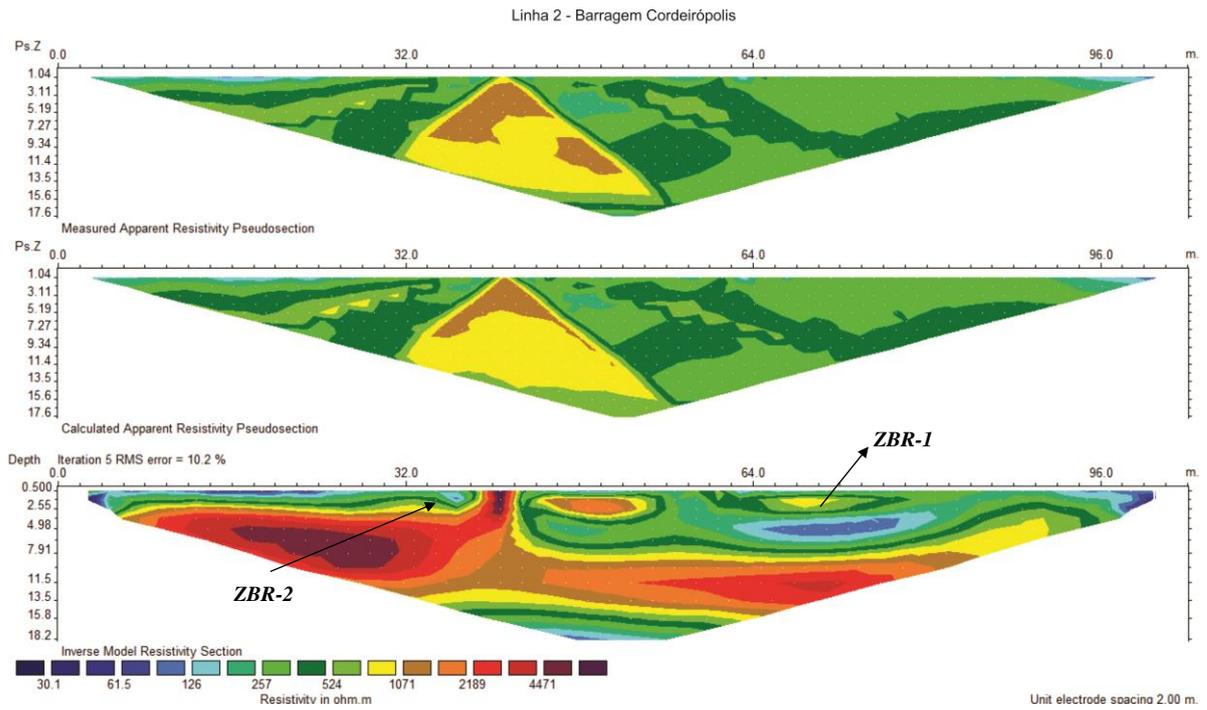
**ANEXO B – IMAGENS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO COM PSEUDO-SEÇÃO, SEÇÃO CALCULADA E SEÇÃO MODELADA – BARRAGEM DE CORDEIRÓPOLIS**

Linha 1 – à jusante.



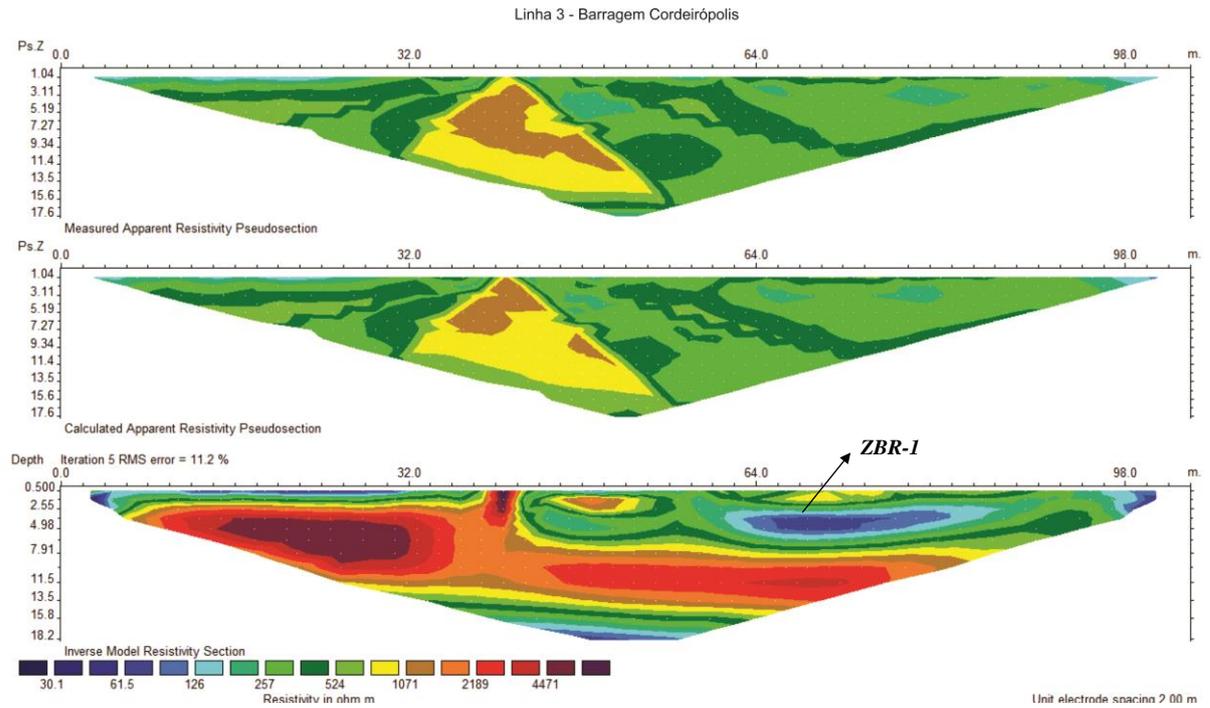
Fonte: Dados da Pesquisa

Linha 2 – posição central



Fonte: Dados de Pesquisa

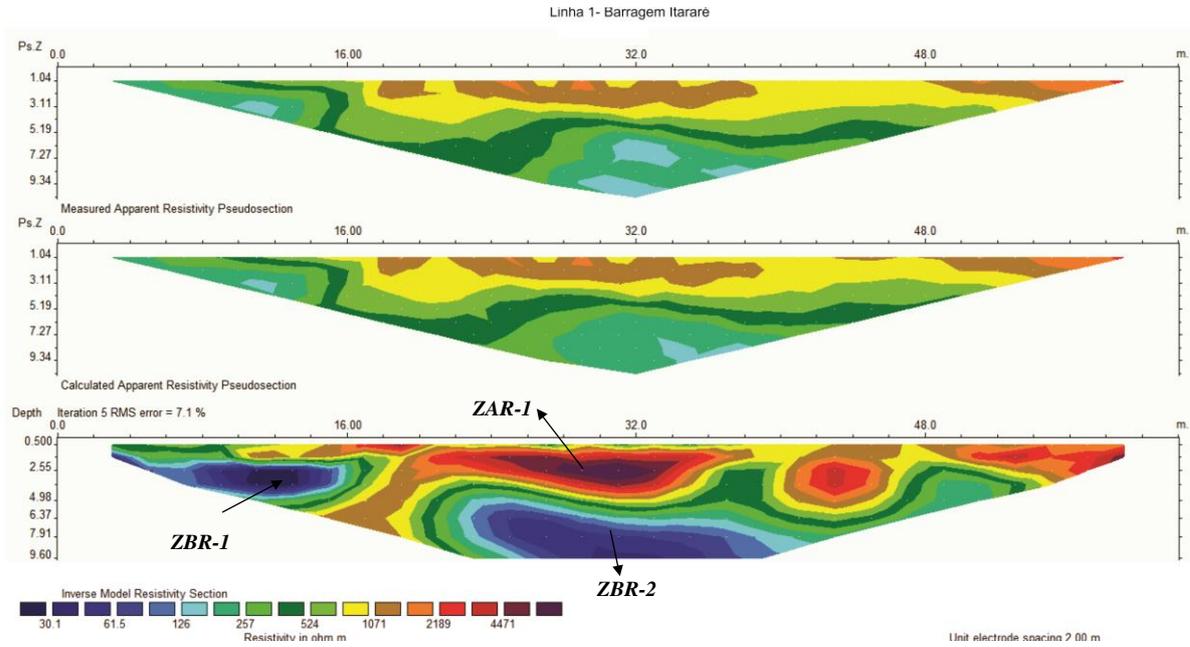
Linha 3 – à montante.



Fonte: Dados de Pesquisa

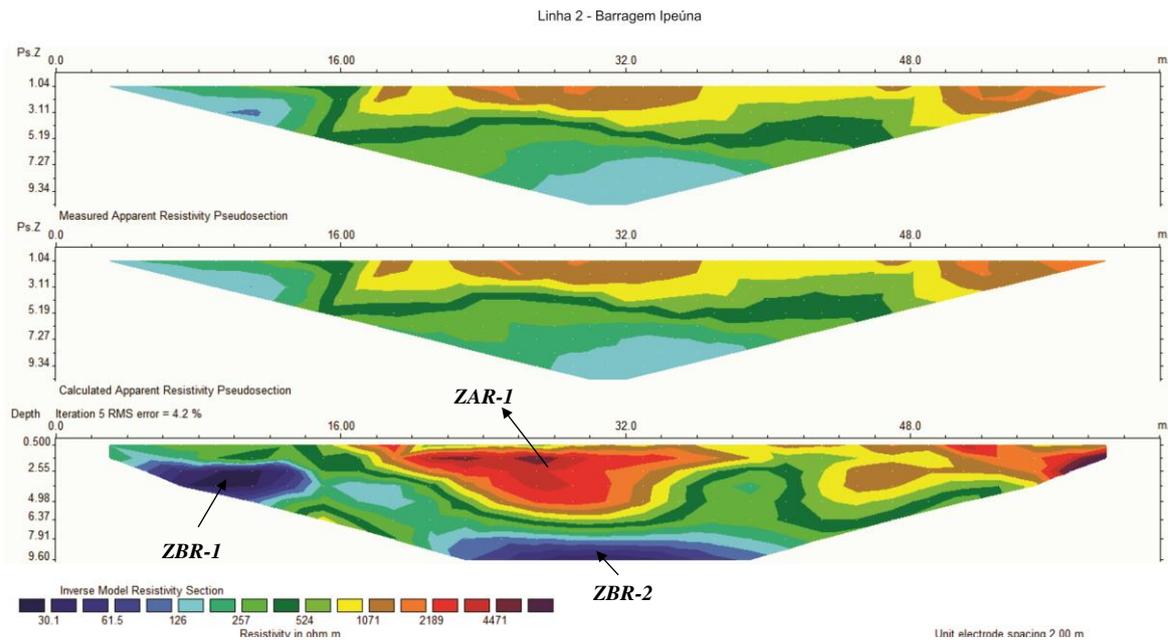
**ANEXO C – IMAGENS DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO COM PSEUDO-SEÇÃO, SEÇÃO CALCULADA E SEÇÃO MODELADA – BARRAGEM DE IPEÚNA**

Linha 1 – à jusante.



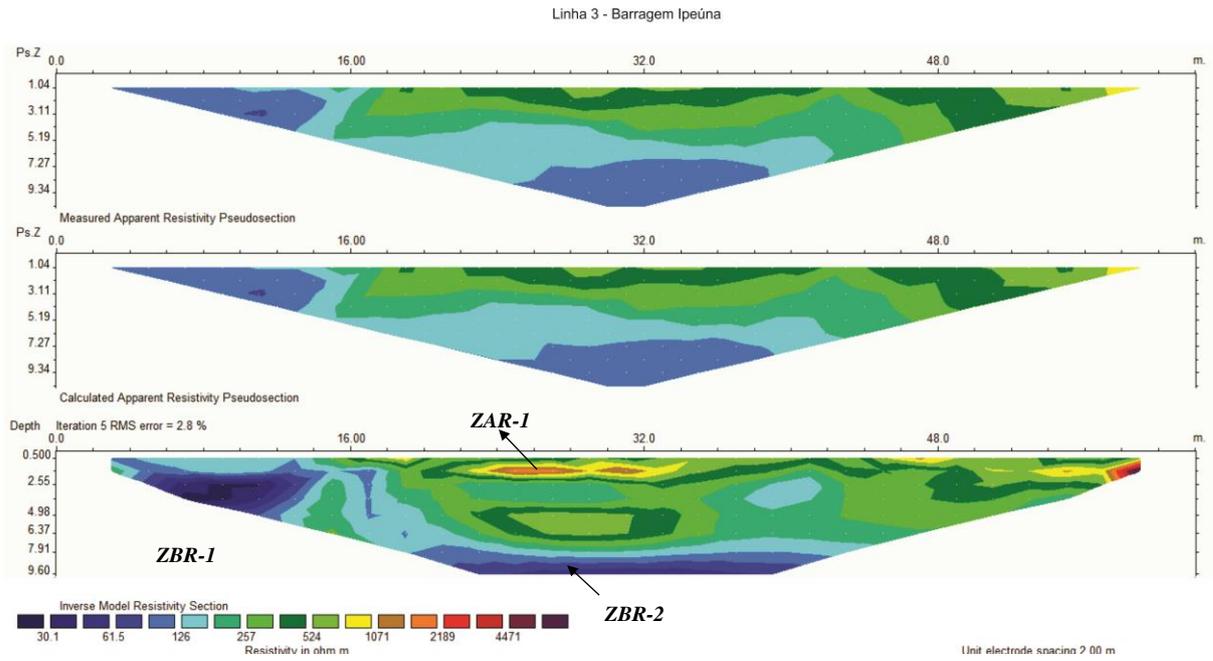
Fonte: Dados de Pesquisa

Linha 2 – posição central



Fonte: Dados de Pesquisa

Linha 3 – à montante.



Fonte: Dados de Pesquisa