



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



Trabalho de Conclusão de Curso  
Curso de Graduação em Geologia

ANÁLISE DA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM BARRAGEM DE TERRA PELO  
MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE.

Glauber Matheus Lira Vieira

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira (orientador)

Rio Claro (SP)

2015

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

Glauber Matheus Lira Vieira

Análise da Percolação de Água em Barragem de Terra pelo  
Método da Eletrorresistividade

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Bacharel em Geologia.

Rio Claro - SP

2015

551      Vieira, Glauber Matheus Lira  
V657a      Análise da percolação de água em barragem de terra pelo  
             método da eletrorresistividade / Glauber Matheus Lira Vieira.  
             - Rio Claro, 2015  
             65 f. : il., figs., tabs., fots.

             Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geologia) -  
             Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
             Ciências Exatas

             Orientador: César Augusto Moreira

             1. Geofísica. 2. Barragem de aterro. 3. Resistividade  
             elétrica. I. Título.

Glauber Matheus Lira Vieira

## Análise da Percolação de Água em Barragem de Terra pelo Método da Eletroresistividade

Trabalho de Conclusão de Curso 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 Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira (IGCE/UNESP RIO CLARO) (orientador)

Prof. Dr. Antônio Celso Braga (IGCE/UNESP RIO CLARO)

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho (IGCE/UNESP RIO CLARO)

Rio Claro, 29 de Janeiro de 2015.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda instituição Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Responsáveis, funcionários e professores, pela oportunidade de poder conviver e por todos os conhecimentos que me foram passados, os quais lutarei para aprimorá-los.

Em especial agradeço ao meu orientador e amigo Cesar Augusto Moreira, pelos ensinamentos, apoio e profissionalismo. Fundamental, atuando diligentemente em prol do conhecimento e crescimento dos seus alunos.

Agradeço aos amigos que somaram nesse período, pelo respeito e consideração por mim. Gesto que com toda certeza, é recíproco.

Agradeço a minha família. Minha mãe Eni e minhas irmãs Juliane e Stephanie, pelo amor e apoio. Aos meus familiares, minha raiz. Especialmente aos meus exemplos de força e superação tia Zélia e tio Hélio.

Agradeço ao meu pai, Clodomiro, meu espelho e exemplo de integridade e caráter, por fazer que um sonho dele, um dia fosse o meu sonho. Sem ele, nada disso seria concreto.

Em um ato egoísta, agradeço a mim, que apesar das barreiras, dificuldades e a grande carga emocional imposta durante essa fase, consegui superar até aqui o meu pior algoz até hoje: eu mesmo. Espero ainda continuar me superando. Não desisti. Não vou desistir.

Meu maior e eterno agradecimento para Deus, que permaneceu comigo, do começo ao fim, ao Alfa e Ômega, ao único digno de toda honra e toda glória deste momento e todos os demais outros desafios que virão. "O temor do Senhor é o principio da sabedoria. O homem sábio é poderoso e quem possui entendimento, potencializa sua força" (Provérbios 1:7a; 24:5).

*“Entre o gatilho e a tempestade. Sempre a provar, que sou um homem e não um covarde. Se tiver que ser na bala, vai.”*

*(Racionais MC's e Vanguart)*

## RESUMO

VIEIRA, G. M. L. **Análise da Percolação de Água em Barragem de Terra pelo Método da Eletrorresistividade**. 2015. 54. Trabalho de Formatura 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 Geólogo. Rio Claro, 2015.

Intervenções na natureza realizadas pelo homem são muito comuns desde o primórdio da história da humanidade, ainda mais no que diz a respeito ao armazenamento de água. As construções de barragens foram e ainda são fundamentais na manutenção da vida humana devido à importância vital que a água exerce. A dimensão dessas estruturas variam de acordo com a necessidade, como captação de água, piscicultura ou geração de eletricidade. Barragens de aterro são o tipo mais comum dessas estruturas. Podem ser definidas como barragens construídas de material natural obtido a partir de câmaras de empréstimo situado na proximidade do local da barragem. Esse tipo de barragem pode ser dividida em barragens de terra e barragens de enrocamento. A área de estudo abrange uma barragem de terra localizada na cidade de Cordeirópolis (SP) e é composta essencialmente por solos alterados de diabásios da Formação Serra Geral da bacia do Paraná. Com auxílio da geofísica, mais especificamente do método da Eletrorresistividade, o objetivo é a verificação de eventuais zonas de infiltração de água no corpo do barramento. Diante dos riscos associados à percolação de água nas barragens de terra, que podem vir a gerar estruturas de desagregação, erosão, e conseqüentemente acidentes e /ou fatores prejudiciais nas áreas próximas. Um dos principais problemas estruturais causados pela infiltração de água é a possível geração de *pipes* que podem comprometer a estrutura da barragem. Este trabalho visa contribuir no sentido de avaliação da eficácia do uso de uma técnica indireta de investigação e monitoramento, em auxílio às técnicas diretas de investigação como piezômetros e estacas de movimentação. Os resultados são apresentados sob a forma de modelos geofísicos 2D e 3D, cuja análise revela uma zona baixa resistividade com valores típicos da presença de umidade originada à montante do barramento e com tendência de afunilamento à jusante, que são base para interpretação em relação à percolação ou não de água na barragem.

**Palavras Chaves:** barragem de aterro, percolação de água, geofísica, resistividade elétrica.

## ABSTRACT

VIEIRA, G. M. L. **Analysis of Water Percolation Earth Dam by the Method of Electrical Resistivity**. 2015. 54. Graduation monograph submitted to Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, of Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, for the degree on Geology. Rio Claro, 2015.

Interventions in nature made by man are very common since the beginnings of human history, especially in the case regarding the storage of water. The construction of dams have been and still are fundamental in maintaining human life due to the vital importance that water plays. The size of these structures vary according to need, such as water catchment, fish-farming or electricity generation. Embankment dams are the most common type of these structures. Can be defined as dams natural material obtained from loan chambers located near the dam site. This type of barrier may be divided into earth dams and rockfill dams. The study area covers an earth dam located in Cordeirópolis (SP) and is essentially composed of diabases altered soil of the Serra Geral Formation of the Paraná Basin. With the aid of geophysics, more specifically of the Electrical Resistivity method, the aim is to check any water infiltration zones in the dam's body. Given the risks associated with water seepage in earth dams, that may generate breakdown structures, erosion, and consequently accidents and / or harmful factors in the nearby areas. One of the main structural problems married by water infiltration is the possible generation of pipes that could jeopardize the dam structure. This work aims to contribute towards the evaluation of the effectiveness of using an indirect technique of research and monitoring in aid to direct research techniques such as piezometers and drive stakes. The results are presented in the form of 2D and 3D geophysical models, the analysis shows a low resistivity zone with typical values of the presence of humidity originating upstream of the dam and downstream bottleneck trend, that are the basis for interpretation by percolation or not water in the dam.

**Keywords:** embankment dam, water percolation, geophysics, electrical resistivity

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1- INTRODUÇÃO</b> .....  | 10 |
| <b>2- OBJETIVO</b> .....  | 12 |
| <b>3- ÁREA DE ESTUDOS E ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS</b> .....  | 13 |
| <b>3.1 - Geologia Regional</b> .....  | 16 |
| Formação Serra Geral .....  | 18 |
| <b>3.2 Geologia Local</b> .....   | 18 |
| <b>3.3 Fatores hidrogeológicos</b> .....  | 20 |
| <b>4- BARRAGENS: TIPOS, PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS E PROBLEMAS<br/>ESTRUTURAIS RELACIONADOS</b> ..... | 21 |
| 4.1 Barragens de Aterro.....  | 31 |
| <b>5- MÉTODOS GEOFÍSICOS</b> .....  | 35 |
| 5.1 Princípios Teóricos dos Métodos Geométricos .....   | 36 |
| 5.1.1 Eletroresistividade.....  | 39 |
| 5.2 Técnicas de Aquisição .....   | 43 |
| 5.2.1 Tomografia Elétrica.....  | 43 |
| 5.2.2 Arranjo Wenner .....  | 43 |
| <b>6- AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS</b> .....   | 45 |
| 6.1 Tratamento dos dados geofísicos.....  | 47 |
| <b>7- RESULTADOS</b> .....  | 49 |
| <b>8- CONCLUSÕES</b> .....  | 59 |
| <b>9- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....  | 61 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Localização da Área de Estudos.....   | 13 |
| Figura 2: Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná .....   | 17 |
| Figura 3: Perfil de alteração de rochas basálticas típicas de áreas de relevo suave . .....                           | 20 |
| Figura 4: Tipos de barragens de aterro.....   | 21 |
| Figura 5: Representação esquemática de barragens de concreto. ....  | 22 |
| Figura 6: Análise de Falha rotacional encosta abaixo pelo método da divisão por blocos                                |    |
| Figura 7: Falha rotacional em encostas argilosas .....  | 26 |
| Figura 8: Fatores geológicos que influenciam na estabilidade da encosta.....  | 27 |
| Figura 9: Deslizamento de terra e/ou queda de material. ....  | 27 |
| Figura 10: Planos potenciais para deslizamento das fundações das barragens sob pressão do reservatório.....           | 28 |
| Figura 11: Modelo de Galgamento em barragem.....  | 28 |
| Figura 12: Modelo de erosão interna ( <i>piping</i> ) em uma barragem .....   | 29 |
| Figura 13: Elementos básicos de uma barragem de terra .....   | 33 |
| Figura 14: Lista Simplificada dos Métodos Geofísicos utilizados em investigações .....                                | 35 |
| Figura 15: Parâmetros usados para definir a lei de Ohm para um condutor linear .....                                  | 38 |
| Figura 16: Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos.....   | 40 |
| Figura 17: Condução de elétrica em metais e rochas.....   | 42 |
| Figura 18: Refração das correntes .....   | 42 |
| Figura 19: Arranjo de eletrodos Wenner e a sequência de medidas utilizadas para a construção de uma pseudoseção ..... | 44 |
| Figura 20: Área da barragem com a disposição das três linhas de aquisição.....  | 46 |
| Figura 21: Pseudoseções e Modelo de inversão de inversão da linha 1 da seção de Resistividade. ....                   | 50 |
| Figura 22: Pseudoseções e Modelo de inversão de inversão da linha 2 da seção de Resistividade ....                    | 50 |
| Figura 23: Pseudoseções e Modelo de inversão de inversão da linha 3 da seção de Resistividade ....                    | 51 |
| Figura 24: Modelos de inversão das linhas 1,2 e 3 da seção de Resistividade.....                                      | 52 |
| Figura 25: Blocos 3D a partir das linhas de aquisição de dados geofísicos. ....                                       | 54 |
| Figura 26: Blocos 3D com pseudoseções a partir de cortes estabelecidos em diferentes profundidades .....              | 56 |
| Figura 27: Blocos 3D com modelos de inversão a partir de cortes estabelecidos em diferentes profundidades.....        | 57 |

## ÍNDICE DE FOTOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Foto 1:</b> Barragem de terra (área de estudos) em Cordeirópolis .....                                 | 15 |
| <b>Foto 2:</b> Solo vermelho-escuro com fragmentos de basalto .....                                       | 19 |
| <b>Foto 3:</b> Bloco de diabásio com alteração do tipo esfoliação esferoidal.....                         | 19 |
| <b>Foto 4:</b> Face de montante da barragem mostrando ruptura e a clara marca do NA da represa .....      | 31 |
| <b>Foto 5:</b> Aparelho geofísico Terrameter LS durante a aquisição dos dados.....                        | 45 |
| <b>Foto 6:</b> Distribuição dos eletrodos na borda da barragem de terra .....                             | 47 |
| <b>Foto 7:</b> Vertedouro de água da barragem na altura de 64 metros da linha de aquisição geofísica..... | 53 |

## ÍNDICE DE FLUXOGRAMAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Fluxograma 1:</b> Procedimentos de outorga para uso de recursos hídricos de acordo com o DAEE..... | 34 |
|---|----|

## ABREVIACÕES

Modificado: Mod.

## 1. INTRODUÇÃO

A capacidade de explorar os recursos naturais é um forte fator de desenvolvimento na história da humanidade, como exemplo a água, que exerce seu papel como recurso vital. Neste sentido, a importância de barragens em curso d'água em suas diversas formas de uso é fundamental para a sociedade.

As barragens vêm sendo construídas desde os primórdios da humanidade para atender as necessidades das populações. A mais antiga que se tem notícia é a barragem de *Jawa*, construída na Jordânia em cerca de 5600 anos. As pequenas barragens ganharam no decorrer dos anos importância econômica e ambiental, sobretudo na geração de energia elétrica através de pequenas centrais hidrelétricas, contenção de rejeitos, irrigação, piscicultura, etc (CARVALHO, 2011).

Na África, mais especificamente nas margens do rio Nilo, para combater períodos de estiagem, foram construídos diques e reservatórios de água, que seriam utilizadas através de canais de distribuição, para uso da agricultura, pecuária e consumo humano. O funcionamento desses canais ocorria por meio do controle dos períodos de cheia. Esse sistema foi fundamental para o desenvolvimento da civilização, até então nômade na região no Egito (DOBERSTEIN, 2010).

Existem diversos tipos de intervenções na natureza realizados pelo homem, no que diz respeito ao armazenamento de água. A proporção de tais empreendimentos varia de acordo com a necessidade. O monitoramento e a manutenção destas estruturas são necessários para garantir seu funcionamento e a segurança para prevenção de acidentes por rompimentos.

As barragens podem ser classificadas quanto ao material utilizado para sua construção, podendo ser de concreto ou aterro. A barragem de aterro pode ser subdividida em barragem de terra e barragem de enrocamento (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998). As barragens de terra são predominantemente de pequeno porte e as mais utilizadas para fins de irrigação em áreas rurais. Este tipo possui construção simplificada, construída a partir de materiais disponíveis no próprio local, com custos comparativamente menores. Contudo, esta simplicidade construtiva pode ocasionar o colapso do barramento e a liberação catastrófica de grandes quantidades de água, na ausência de critérios técnicos adequados.

Barragens de terra são construídas preferencialmente com solos de granulometria fina, baixa permeabilidade, onde o comportamento é influenciado principalmente pelas poropressões (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998).

Métodos diretos e indiretos de investigação são utilizados no estudo de barragens com intuito de estabelecer melhores condições para construção e monitoramento dessas estruturas.

Os métodos indiretos de estudo e monitoramento de condições geológicas incluem uma série de ensaios geofísicos.

A geofísica é uma área de conhecimento que através dos seus diferentes métodos permitem a investigação indireta e não invasiva em solos, rochas e estruturas. É prática para a averiguação interpretativa de características geológicas intrínsecas, que ocorrem em subsuperfície. O uso da geofísica em estudo de barragens é apropriado principalmente para os casos de barramento de terra, material geológico que apresenta contraste em propriedades físicas, mensuráveis pelos métodos geofísicos. Fatores que provocam o rompimento da barragem, como o fluxo de água no barramento ou no substrato rochoso, produzem um contraste de propriedades físicas detectáveis pelo método geofísico da Eletrorresistividade.

Portanto, diante da vulnerabilidade de rompimento por infiltração em barragens e do potencial de aplicação da geofísica, como ferramenta de monitoramento, este trabalho propõe o estudo geofísico em uma barragem de terra localizada na zona rural de Cordeirópolis (SP), para detecção de eventuais contrastes em propriedades físicas, que permitam o reconhecimento de zonas com percolação de água. Um trabalho anterior com ênfase da realização de estudos geofísicos em barragens de pequeno porte foi realizado por Malagutti Filho et al. (1999, p 53-67) que propunha o estudo dessas estruturas por diferentes métodos geofísicos.

O acesso irrestrito área de estudo e a disponibilidade de equipamento junto ao laboratório de geofísica do Departamento de Geologia Aplicada (IGCE-UNESP RIO CLARO) são facilitadores para realização deste trabalho que tem por justificativa monitorar a formação de estruturas de desagregação através de estudos geofísicos. E com os resultados obtidos é possível tomar medidas para prevenção - por parte dos responsáveis pela barragem - que possam evitar possíveis acidentes futuros.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é aplicação do método geofísico da Eletrorresistividade no estudo de uma barragem de terra, para avaliação de eventuais zonas de percolação de água, que podem acarretar no rompimento da barragem e ocasionar acidentes. O trabalho está baseado na análise do contraste de propriedades físicas e suas relações com o grau de umidade no maciço de terra que compõe a barragem, a partir de ensaios de tomografia elétrica por meio do arranjo Wenner.

### 3. ÁREA DE ESTUDOS E ASPECTOS FIOGRÁFICOS

A área de estudos possui uma barragem de terra para o armazenamento de água localizada na zona rural da cidade de Cordeirópolis (SP) (Figura 1).



**Figura 1:** Localização da Área de Estudos (Mod Google EARTH).

Esta área está contida na província geomorfológica denominada Depressão Periférica Paulista, Zona do Médio Tietê. Apresenta topografia bastante suave, representada por colinas extensas e restritas, de formas suaves e de baixa amplitude, com esparsos morros testemunhos, morrotes alongados e espigões, dispostos a atitudes de 500-680m (ALMEIDA, 1964).

Os relevos da região são do tipo colinas médias e morrotes alongados, além de relevos sustentados por maciços básicos, como no caso específico da área de estudos, além de encostas, com cânions locais e escarpas festonadas (PONÇANO, 1981).

O perfil de alteração de solo local é típico de rochas basálticas, com sua coloração vermelho escura característica, além de apresentar blocos alterados de diabásio dispostos no solo. Esse perfil de alteração é constituído por solo argiloso, seco, pouco friável e com dificuldades de quebra e penetração, como exemplo, das estacas dos eletrodos.

A classificação climática de Köppen é o sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia. Segundo esta classificação, baseada em dados mensais pluviométricos e termométricos, o estado de São Paulo abrange sete tipos climáticos distintos, a maioria correspondente a clima úmido. O tipo dominante na área é o Cwa, que abrange toda a parte central do estado e é caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C.

A cidade de Cordeirópolis (SP) apresenta temperatura mínima média anual de 14,9 °C, temperatura média máxima anual de 27,6 °C e volume anual de chuvas de 1367,1 milímetros (Tabela 1).

| <b>Cordeirópolis</b>                    |                              |                    |        |                      |
|---|------------------------------|--------------------|--------|----------------------|
| Latitude: 22g 17m                       |                              | Longitude: 47g 16m |        | Altitude: 660 metros |
| Classificação Climática de Koeppen: Cwa |                              |                    |        |                      |
| <b>MÊS</b>                              | <b>TEMPERATURA DO AR (C)</b> |                    |        | <b>CHUVA (mm)</b>    |
|   | mínima                       | média              | máxima |                      |
| <b>JAN</b>                              | 18.3                         | 23.9               | 29.5   | 240.9                |
| <b>FEV</b>                              | 18.5                         | 24.0               | 29.5   | 215.2                |
| <b>MAR</b>                              | 17.7                         | 23.5               | 29.2   | 160.3                |
| <b>ABR</b>                              | 15.1                         | 21.3               | 27.6   | 53.2                 |
| <b>MAI</b>                              | 12.4                         | 19.0               | 25.7   | 50.5                 |
| <b>JUN</b>                              | 11.0                         | 17.8               | 24.6   | 40.4                 |
| <b>JUL</b>                              | 10.4                         | 17.6               | 24.8   | 29.6                 |
| <b>AGO</b>                              | 11.8                         | 19.4               | 26.9   | 27.2                 |
| <b>SET</b>                              | 13.8                         | 20.9               | 28.0   | 55.9                 |
| <b>OUT</b>                              | 15.5                         | 22.0               | 28.4   | 131.5                |
| <b>NOV</b>                              | 16.4                         | 22.6               | 28.8   | 140.9                |
| <b>DEZ</b>                              | 17.6                         | 23.2               | 28.8   | 221.5                |
| <b>Ano</b>                              | 14.9                         | 21.3               | 27.6   | 1367.1               |
| <b>Min</b>                              | 10.4                         | 17.6               | 24.6   | 27.2                 |
| <b>Max</b>                              | 18.5                         | 24.0               | 29.5   | 240.9                |

**Tabela 1:** Dados climáticos do município de Cordeirópolis segundo CEPAGRI/Unicamp (MIRANDA et al., 2014).

O trabalho de campo de obtenção de dados geofísicos foi realizado em um período de menor pluviosidade, para que não houvesse influência de água meteórica no solo, fator que tem grande influência nos resultados.

Com isso, sem a presença de água meteórica, os modelos de inversão fornecerão apenas valores referentes à infiltração de água relacionada com a barragem de terra.

O trabalho de campo foi realizado no mês de abril de 2014 que apresenta uma média de chuvas no período de 53,2 mm, de acordo com a CEPAGRI/UNICAMP, no entanto, neste período do ano foi caracterizado por um período de seca na região, com raríssimas chuvas.

A barragem (Foto 1) está situada nas proximidades do entroncamento das Rodovias Bandeirantes e Washington Luiz. Este local é caracterizado por ser uma área rural, com predomínio do plantio de cana-de-açúcar. O local também é utilizado como área para pesca.

A barragem de terra possui algumas características que podem ser destacadas. É composta de material geológico advindos do próprio local, um solo argiloso muito compactado típico de alteração além de blocos de rocha.



**Foto 1:** Barragem de terra (área de estudos) em Cordeirópolis.

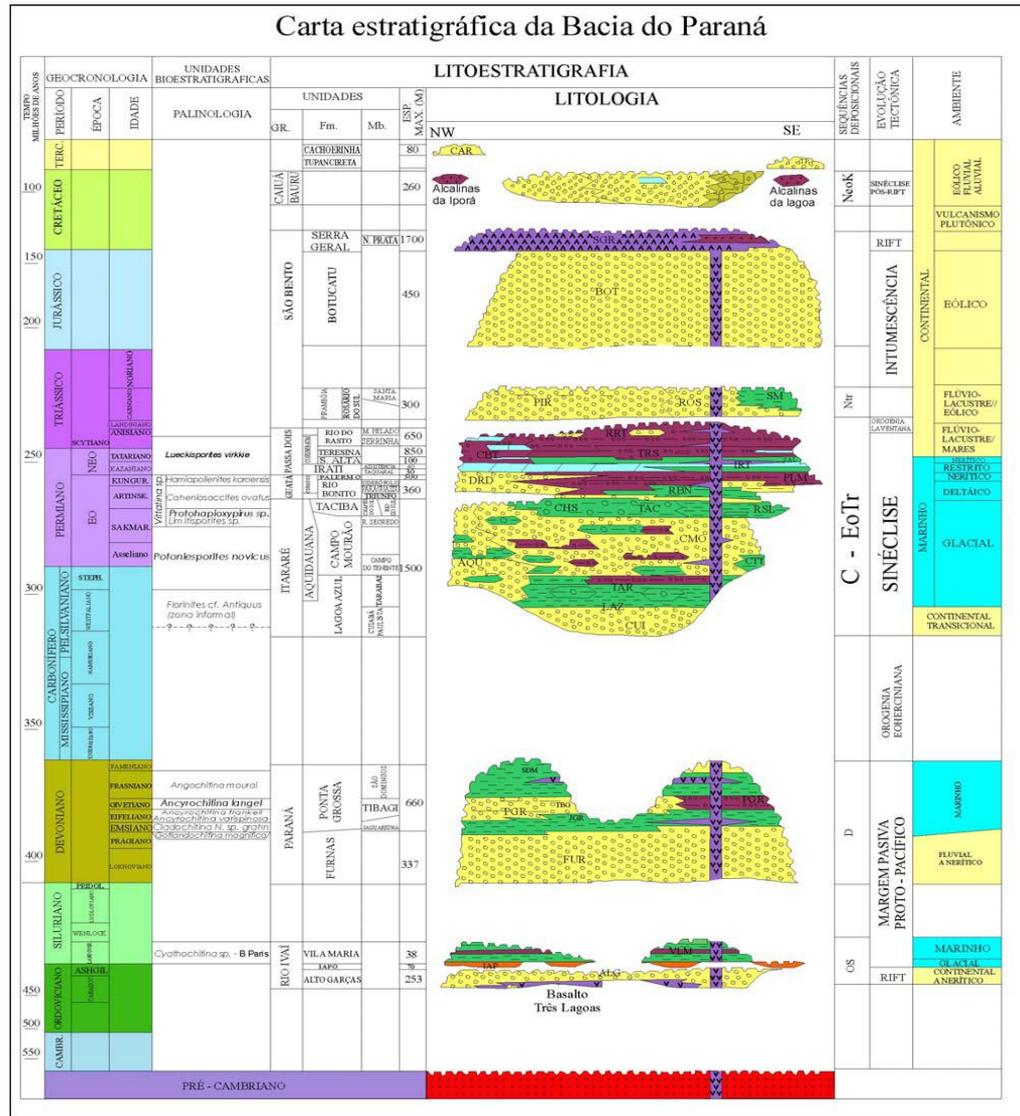
O maciço de terra (corpo da barragem) coincide com uma estrada de terra para locomoção de veículos locais. A barragem possui a dimensão de cerca de 12 metros de altura. A borda a montante (contato com a água) da barragem apresenta aproximadamente cerca de 60 metros de comprimento. As bordas laterais apresentam aproximadamente 375 metros e 420 metros, borda à esquerda e borda à direita, respectivamente (vide Figura 1). Esta área está contida na província geomorfológica denominada Depressão Periférica Paulista, Zona do Médio Tietê. Apresenta topografia bastante suave, representada por colinas extensas e restritas, de formas suaves e de baixa amplitude, com esparsos morros testemunhos, morrotes alongados e espigões, dispostos a atitudes de 500-680m (ALMEIDA, 1964).

### 3.1 Geologia Regional

A área de estudos está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, que representa uma extensa área de depósito sedimentar do continente sul-americano, e é encontrada entre os territórios dos países: Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. A extensão territorial da Bacia do Paraná é aproximadamente 1,5 milhões km<sup>2</sup>. No Brasil a área da bacia é de 1,2 milhões km<sup>2</sup>, compreendendo oito estados na região centro-sul do país. Tem uma forma ovalada com eixo maior no rumo N-S (MILANI *et al.*, 2007).

A Bacia do Paraná apresenta um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros (ZALÁN *et al.*, 1991).

Algumas formações são representativas na região e apresentam relação de contato discordante com a Formação Serra Geral (a única aflorante na área de estudos). As formações presentes na região estão contidas na carta estratigráfica. A Figura 2 apresenta uma carta estratigráfica representativa da Bacia do Paraná.



**Figura 2:** Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná (MILANI et al, 1994).

A carta apresenta as formações que ocorrem na Bacia do Paraná, porém é possível destacar a importância geológica local de algumas formações que são descritas a seguir:

### Formação Corumbataí

Dentro do Grupo Passa Dois a Formação com deposição no Permiano Superior contém em sua parte inferior argilitos, folhelhos e siltitos de cores cinza escura, na parte superior, em argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados com intercalados com bancos carbonáticos e camadas de arenitos muito finos (SOARES; LANDIM, 1975).

### **Formação Serra Geral (Cretáceo)**

A Formação Serra Geral de idade Cretácea (137 e 127 milhões de anos) se refere à província magmática relacionada aos derrames e intrusivas que recobrem  $1,2 \times 10^6$  km<sup>2</sup> da Bacia do Paraná (CPRM, 2006). Os eventos de sedimentação extensiva na Bacia do Paraná foram cessados com o magmatismo Serra Geral e são relacionados a esse intenso magmatismo fissural, representado na forma de uma espessa cobertura de lavas, que se acumularam por quase 2000 m de espessura de lavas basálticas, além de intrusões concordantes ou discordantes nas demais unidades litoestratigráficas pretéritas, sob a forma de diques e soleiras.

As rochas basálticas são compostas essencialmente por feldspatos e piroxênios. Podem apresentar matriz constituída por fenocristais de augita, plagioclásio, pigeonita, alguma titanomagnetita e rara olivina. As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral são representadas por basaltos toleíticos (90% em volume), andesitos toleíticos (7% em volume) e por riodacitos-riólitos (3% em volume). Os derrames basálticos e andesíticos são representados por rochas afíricas e subafíricas. Os minerais opacos mais comuns são a magnetita e a ilmenita (TORRES, 2005). Pode apresentar também composição dacítica em certas regiões (MATTOS, 2012; CPRM, 2006).

A granulação dos minerais é fundamental para classificação da rocha, que no caso da área de estudos, são classificadas como diabásios. Apresenta contato discordante com todas as outras formações da região.

### **Formação Rio Claro**

Formação Cenozóica no limite Terciário-Quaternário que apresenta depósitos de arenitos arcossianos pouco consolidados, mal classificados, arenitos conglomeráticos na base e argilitos vermelhos em lentes. O ambiente de deposição é continental de planície aluvial, lacustre e coluviões (SOARES; LANDIM, 1975; PERINOTTO; ZAINÉ, 2008).

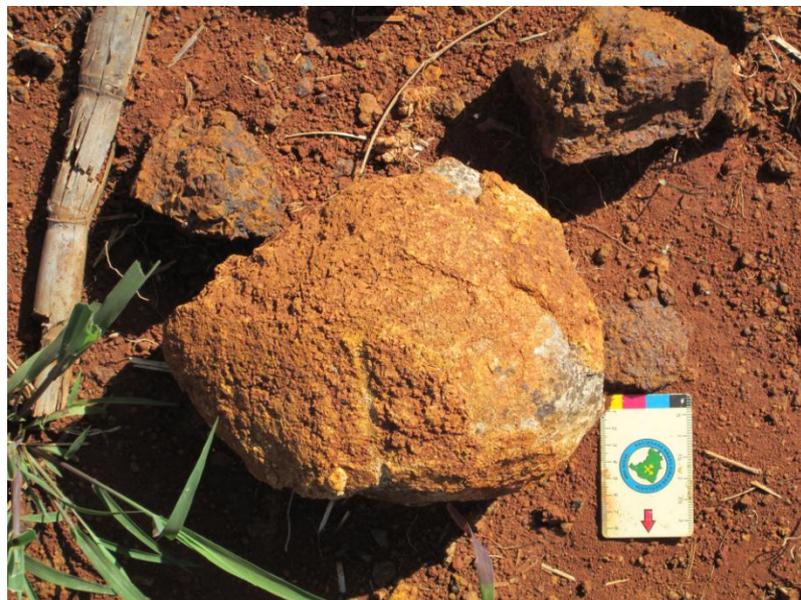
## **3.2 Geologia Local**

A barragem de terra está assentada sobre solos argilosos de coloração vermelho-escuro, com fragmentos diabásio com diversos graus de alteração (Fotos 2 e 3). Esse material geológico é típico da Formação Serra Geral. Em campo é possível observar na superfície do terreno quantidades visivelmente elevadas de magnetita e hematita.

Cabe ressaltar que a base da barragem está sobre uma zona fraturada, o que também pode gerar instabilidades no maciço de terra e gerar a possibilidade de uma desagregação futura.



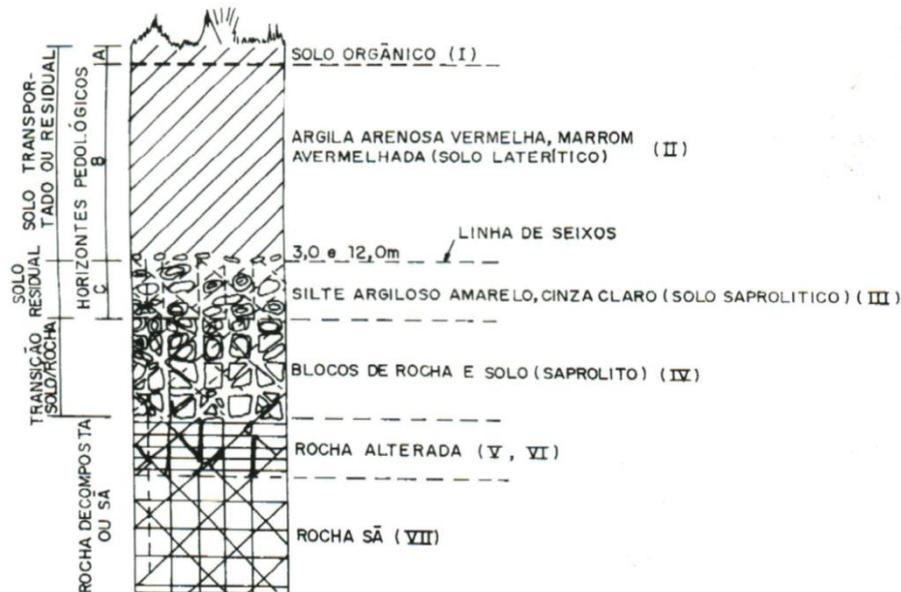
**Foto 2:** Solo vermelho-escuro com fragmentos de basalto



**Foto 3:** Bloco de diabásio com alteração do tipo esfoliação esferoidal.

O intemperismo de rochas basálticas gera perfis de alteração típicos, com profundidades variáveis, condicionadas à morfologia do terreno. Os principais estratos constituem essencialmente solo argiloso e gradativo aumento em profundidade da quantidade

de blocos rochosos, com intemperismo variável, assentados em rocha inalterada, cujo contato frequentemente constitui o nível freático local (Figura 3).



**Figura 3:** Perfil de alteração de rochas basálticas típicas de áreas de relevo suave (PASTORE; FONTES, 1998).

Os barramentos construídos nesse tipo de substrato são caracterizados por baixíssimas taxas de infiltração vertical, devido à presença de solos argilosos. Nesse sentido, os materiais de construção de barramentos de terra, resultam numa estrutura de baixa permeabilidade.

### 3.3 Fatores Hidrogeológicos

Aquífero pode ser definido como um reservatório de água contida em uma rocha ou grupos de rochas, capazes de armazenar e/ou que permitem transmissão de fluido devido a características intrínsecas, como porosidade, permeabilidade, descontinuidades e entre outras. A unidade aflorante na área de estudos apresenta um aquífero homônimo em escala regional (Sistema Aquífero Serra Geral) onde as características litológicas fazem com que essas rochas não possuam porosidade e permeabilidade primárias, importantes para o armazenamento de volumes significativos de água.

As vazões médias dos poços que seccionam as estruturas aquíferas oscilam entre 5 e 35  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , com existência de alguns que atinge valores superiores a 100  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O armazenamento e a circulação da água ocorrem segundo as descontinuidades físicas da rocha (juntas, falhas geológicas e superfícies interderrames), constituindo de um meio heterogêneo e anisotrópico (REBOUÇAS, 1978; ROSA FILHO et al. 2006).

#### 4. BARRAGENS: TIPOS, PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS E PROBLEMAS ESTRUTURAIS RELACIONADOS.

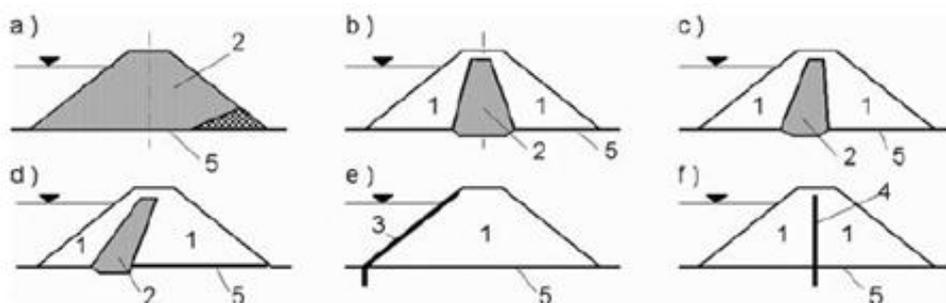
As barragens podem ser utilizadas de diversas formas e foram construídas em prol do desenvolvimento do planeta. Elas têm diversas funções como o armazenamento, geração de energia e como barragens de contenção. Neste trabalho, são estudadas especificamente barragens para o armazenamento de água.

Barragens são estruturas hidráulicas utilizadas para o armazenamento de água que tem por objetivo elevar o nível de água e criar um (reservatório de captação) lago artificial. De acordo com a sua importância e dimensões, a complexidade dos problemas que devem ser resolvidos durante a concepção e construção, faz dessas construções uma das mais importantes para a engenharia, com grande influência sobre o meio ambiente (LEWIS, 2014).

Essas estruturas são construídas com materiais locais tais como: argila, barro, areia, cascalho, brita, as mais modernas, de concreto. Elementos estruturais particulares exigem asfalto, aço, madeira, materiais plásticos, entre outros. O tipo mais comum de barragens são as de aterro e de concreto (TANCHEV, 2014).

Há três tipos de barragens de concreto classificadas como: concreto-gravidade, gravidade aliviada de contraforte e em arco. Barragens de aterro são subdivididas em barragem de terra e barragem de enrocamento (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998).

As barragens de aterro são construídas por meio da compactação do local de materiais (solo e materiais de enrocamento). Sua seção transversal tem geralmente a forma de um trapézio (Figura 4).

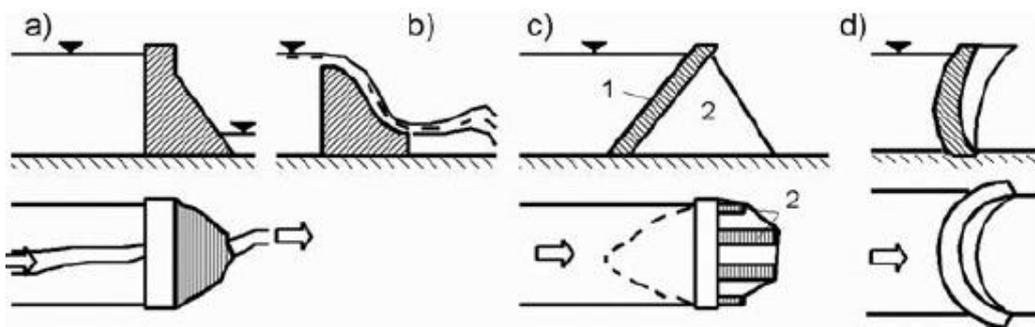


**Figura 4:** Tipos de barragens de aterro. (a) homogênea; (b, c, d) zoneamento; (e) com impermeável forro cara, e (f), com uma parede de núcleo interno feito de material artificial. (1) Aterro de material permeável; (2) Material de terra impermeável; (3) talude; (4) parede diafragma (núcleo) feito de artificialde material; (5) fundação impermeável (TANCHEV, 2014).

A barragem de aterro é classificada como homogênea, quando o barramento é feito de material de permeabilidade pouco variável. Barramentos com zoneamento são construídos com grande variedade de materiais, cuja permeabilidade é assegurada por meio de uma zona relativamente fina de material coesivo. Há também um terceiro tipo de aterro na construção de barragens onde a impermeabilidade é conseguida por meio de revestimento, ou por meio de uma parede de material artificial, tais como concreto, asfalto, geossintéticos, ou aço, que é muito raro.

Pelo fato de a área de estudos deste trabalho ser representada por uma barragem de terra, maiores detalhes acerca deste tipo serão fornecidos posteriormente.

Barragens de concreto têm estimativa aproximada de seção transversal de uma barragem de gravidade sob a forma de um triângulo que pode ser distinguido de uma barragem de aterro (Figura 5).



**Figura 5:** Representação esquemática de barragens de concreto. a e b) Concreto-Gravidade. c) gravidade aliviada de contraforte. d) barragem em arco (TANCHEV, 2014).

Na concepção de barragens é necessário que haja dados suficientemente significativos e abundantes sobre as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas para fundação. Para o efeito de construção da barragem ou monitoramento, é necessário a realização de obras de engenharia geológica e geotecnia de investigação de campo.

Testes de laboratório complementam os procedimentos a fim de determinar as estruturas como a geologia da fundação, tectônica, estratigrafia, falha, folheação e juntas, bem como as relações estruturais, a permeabilidade da rocha, o nível das águas subterrâneas, composição química, características de deformação e características de resistência dos materiais (TANCHEV, 2014).

O monitoramento das barragens desde sua construção é fator fundamental para prevenção de acidentes. De acordo com Lewis (2014, p. 104), melhores resultados podem ser obtidos através do desenvolvimento de registros de observações consistentes. Após uma

sequência específica de observações durante a inspeção é útil uma abordagem de itens, tais como:

- inclinação à montante
- crista
- talude de jusante
- todas as áreas de infiltração
- vertedouro.

A frequência de inspeção necessária exigida para um programa efetivo de monitoramento depende de uma variedade de fatores como:

- tamanho ou capacidade da barragem;
- condição da barragem (categoria de risco); e
- potencial de danos resultantes da falha da barragem (categoria de perigo).

Para o monitoramento geotécnico são utilizados diversos procedimentos que também auxiliam nos estudos de barragens. Os métodos diretos de investigação envolvem ensaios de perfuração para testes e coleta de amostras, como o SPT (Standard Penetration Test), que é um método útil para obter estimativas da densidade relativa, ângulo de atrito efetivo, além de avaliar o potencial de liquefação de areias saturadas.

A sondagem é um outro método amplamente utilizado para análises de subsuperfície, abertura de poços, trincheiras, shafts e túneis. Estabelecer as propriedades físicas e mecânicas dos materiais por meio de testes de laboratório é um método complementar para análise. Os materiais abaixo da fundação da barragem são investigados por métodos de mecânica do solo, e sempre que possível é necessário investigar amostras indeformadas do material, onde as condições laboratoriais de teste devem ser as mais realistas possíveis (TANCHEV, 2014).

Para o controle de nível d'água em subsuperfície, são utilizados diferentes tipos de piezômetros. Alguns possuem a característica de determinar a pressão neutra ou subpressão em maciços de terra, talude ou fundações, analogamente importantes no estudo de barragens de terra. A análise de movimentação do maciço de terra é realizada através de estudos geodésicos, que analisam milimetricamente caso haja movimentos durante um período pré-determinado, com o auxílio de aparelhos específicos, como exemplo, o monitoramento através da estação total (ZOCOLOTTI FILHO, 2005).

Os métodos indiretos de investigação são utilizados para o estudo dessas estruturas costumam apresentar resultados satisfatórios para interpretação. No caso de uma barragem de terra de pequeno porte, monitorada com auxílio da geofísica, é possível a detecção de

eventuais cavidades e/ou zonas de percolação de água que geram ou aumentam processos de movimentos de massa (MALAGUTTI FILHO et al., 1999).

A periodicidade da inspeção de uma barragem particular é da responsabilidade do proprietário, todavia as grandes barragens, ou as suspeitas de estar em um alto risco ou na categoria de perigo, requerem um aconselhamento profissional. Inspeções abrangentes, detalhadas, podem ser alternadas com inspeções mais frequentes, rápidas e análises visuais destinadas a detectar mudanças incomuns que podem ter ocorrido no período de transição.

A rotina regular de inspeção permite ao proprietário da barragem tomar consciência do risco existente, antes que ocorram falhas parciais ou totais do barramento. São recomendadas inspeções antes, durante e/ou após uma grande tempestade prevista, no que é importante verificar o vertedouro e tubo de saída de água da barragem, além de conferir à montante a inclinação da massa dos danos causados pela ação das ondas. Em alguns países com incidência de terremotos ou tremores de terra é importante a averiguação depois destes eventos.

Em 20 de setembro de 2010 foi promulgada a Lei Federal n. 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água, que abrange todos os tipos de barragens do país, como exemplo:

- De acúmulo de água para usos múltiplos
- De acúmulo de água para geração de energia
- De rejeitos de mineração
- De resíduos industriais

A regulamentação da lei é voltada para principalmente para barramentos de médio e grande porte, o que deixa a desejar a respeito das barragens de pequeno porte. Este último tipo de barramento apresenta grande difusão condicionada pela economia e a expansão das fronteiras agrícolas, como exemplo, a agricultura familiar. Porém o aumento desse tipo de barragem, não foi acompanhado por uma intensificação da fiscalização das outorgas e principalmente, do monitoramento dessas estruturas hidráulicas. Outro ponto a destacar, é a ausência de estudos científicos que abordem de forma mais sistemática os procedimentos operacionais de monitoramento e manutenção de pequenos barramentos, o que caracteriza a situação da maioria das barragens de terra no Brasil (CERRI et al., 2011).

O Ministério da Integração Nacional com o trabalho de Aires et al. (2002, p.148) pela Secretaria de Infraestrutura Hídrica, desenvolveu um Manual de Segurança e Inspeção de Barragens que abrange métodos e todos os percalços relacionados ao armazenamento de água de pequeno e grande porte em território nacional. Da mesma forma o DAEE (2006, p. 64-96)

(DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA) além de fiscalizar junto a outros departamentos este tipo de construção, também orienta em seu guia, os profissionais e técnicos que atuam na área, com conceitos, metodologias, critérios, referências sobre os conceitos da construção e inspeção de pequenos barramentos, como a determinação da vazão de enchente, hidráulica básica de canais, travessias e barramentos e podem acompanhar os passos para a elaboração do projeto básico.

O rompimento de pequenas barragens podem não apresentar fatores de destruição tão significativos quanto às barragens de grande e médio porte. Todavia, a desagregação das barragens são potencializadas pela ocorrência de processos de movimentos de massa, como é o caso das corridas de detritos, que causam grandes prejuízos econômicos, sociais e ambientais (CERRI et al., 2011). E com a realização das inspeções, o reconhecimento de feições, situações adversas ou alguma anomalia que possa gerar a instabilidade da barragem e/ou estruturas da área de jusante, podem ser prevenidas.

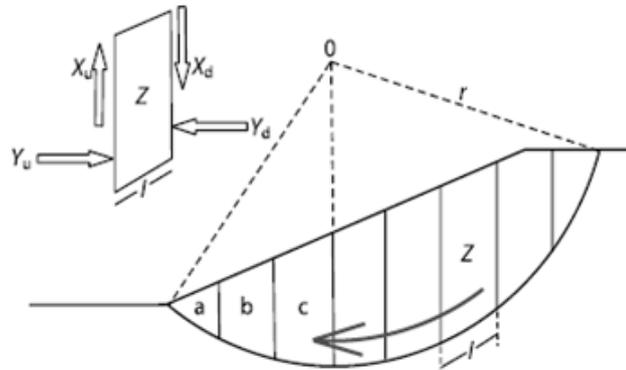
Esses movimentos de massa têm início devido às pressões que são impostas aos materiais geológicos, esse fator é conhecido como poropressão. Poropressão é a pressão que um fluido exerce no interior dos poros de elementos como solo e rocha. A poropressão na barragem atua de forma que a água flui para o corpo da barragem sob estresse, o que gera o aumento da pressão nos poros do solo que compõe a barragem de terra e isso poderia perturbar o equilíbrio das tensões e provocar falhas, possivelmente, até mesmo induzindo sismicidade local, fator que pode vir eventualmente gerar o rompimento da barragem (PRICE, 2009).

Cabe ressaltar a importância da desagregação de uma barragem causada por diversos fatores. Na teoria o deslizamento de material (terra e/ou blocos de rocha) e o mecanismo de deslizamento de barragens podem ser comparados.

Como exemplo, o deslizamento em solos coesivos que ocorre de forma onde há a geração de falhas totais, ou parciais, na rotação para baixo do material. A encosta é falhada em uma forma que lembra um arco, que adentra para solo ou encosta.

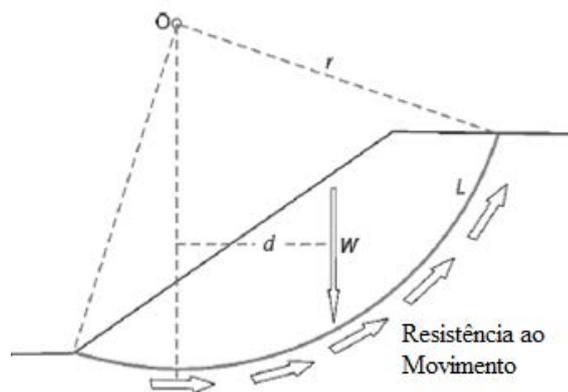
Fator de segurança ( $F_s$ ) é a razão entre as forças que resistem ao movimento e as que promovem o movimento, no caso, encosta abaixo. A Figura 6 apresenta um conjunto desses fatores que atuam em uma análise do movimento encosta abaixo, caso haja desagregação. A resistência ao movimento, encosta abaixo depende da força de cisalhamento da base do bloco e o suporte ( $Y_u$ ) do bloco da curva descendente; as forças que promovem a circulação são o componente de deslizamento de peso do bloco e o empurrão ladeira abaixo do bloco na curva ascendente. Como toda a inclinação se move em rotação, cada bloco teria se desenvolver

forças ( $X_u$  e  $X_d$ ) ao longo de seus lados verticais, a fim de haver movimentação em relação aos blocos adjacentes (PRICE, 2009).



**Figura 6:** Análise de Falha rotacional encosta abaixo pelo método da divisão por blocos (PRICE, 2009).

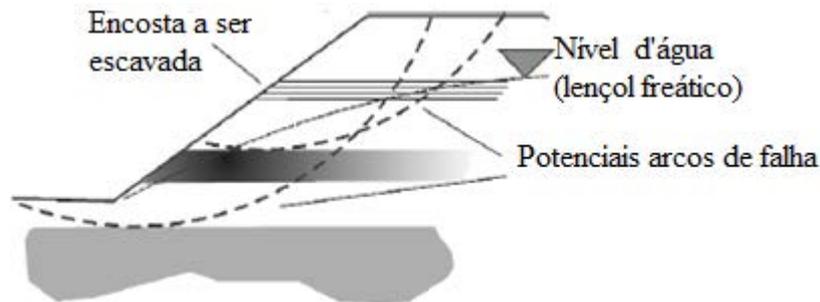
Se a água emerge da inclinação, as pressões atuarão sobre os blocos, reduzindo fatores de segurança. Teoricamente, em solos argilosos sob condições não drenadas, o equilíbrio de momento é considerado na análise ao longo de uma superfície de ruptura, como um arco circular. A superfície de ruptura experimental (centro  $O$ , raio  $r$  e comprimento  $L$ ) é mostrada na Figura 7. O Potencial de instabilidade é devido ao peso total do solo massa ( $W$ ) acima da superfície da falha (PRICE, 2009).



**Figura 7:** Falha rotacional em encostas argilosas (Mod. PRICE, 2009).

Alguns fatores são muito importantes e estão diretamente envolvidos na estabilidade da encosta. Como exemplo os níveis das águas subterrâneas, como aponta o estudo, onde o nível de água da barragem é considerado. As camadas de que compõem a encosta/barragem,

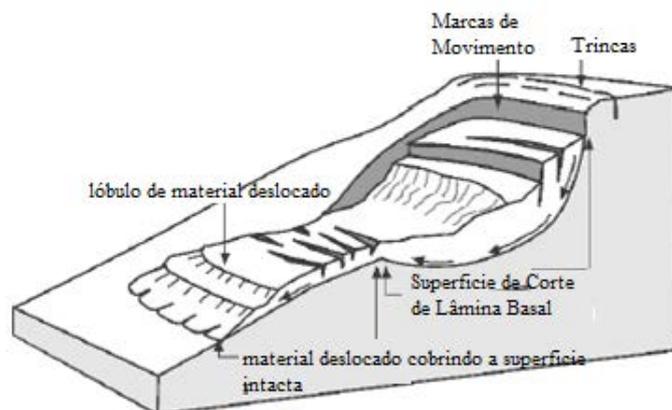
apresentam diferentes propriedades e podem controlar a localização do círculo de deslizamento que pode emergir na inclinação ou ir além do pé do talude (Figura 8).



**Figura 8:** Fatores geológicos que influenciam na estabilidade da encosta (Mod. PRICE, 2009).

Há muitos tipos diferentes de movimento de massa (termo que abrange todos os tipos de inclinação por perturbação), desde rochas caindo de um penhasco aos deslizamentos de terra maiores geralmente podem produzir uma paisagem acidentado com lagoas ou áreas pantanosas (Figura 9).

Grandes deslizamentos geralmente envolvem rochas e produzem uma paisagem acidentada com lagoas ou áreas pantanosas.



**Figura 9:** Deslizamento de terra e/ou queda de material (Mod. PRICE, 2009).

O mecanismo de deslizamento de barragem pode ser comparado aos deslizamentos de material encosta abaixo. Pode acrescentar então um fator importante: nem todas as cargas impostas (vetores) são verticais, a exemplo da composição de uma barragem. Como é o caso

da pressão de água, que começa atuar gerando um componente horizontal. Esse fator tem grande atuação no reservatório e é resistida pela massa da barragem, ou seja, contato entre água e solo. A magnitude desse fator depende do tipo de barragem, no caso de barragens de terra inclinadas, a força dessa componente é baixa.

De acordo com Price (2009, p. 370-372), estas forças horizontais, podem ocasionar na fundação da barragem o deslizamento ao longo de uma descontinuidade angular, tal como uma zona de cisalhamento, ou falha no plano em sua base (Figura 10).



**Figura 10:** Planos potenciais para deslizamento das fundações das barragens sob pressão do reservatório (Mod. PRICE, 2009).

O componente horizontal pode gerar na barragem, além do deslizamento, desagregações em pontos específicos, devido às diferenças de imanência do material.

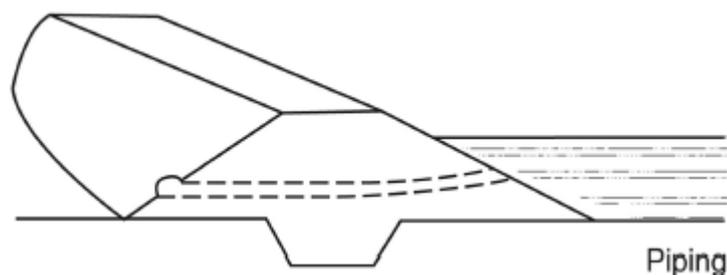
Os mecanismos mais comuns de acidentes neste tipo de barragem são galgamento (*overtopping*), deslizamento de taludes, *piping* (erosão interna) e fissuramento. O galgamento é a causa mais frequente de problemas, já que barragens de aterro não resistem à passagem de água sobre as mesmas; esse fator pode dar início a erosão na encosta da barragem (Figura 11), podendo ser solucionado com a presença de um vertedor de água adequado ao local da barragem. Os deslizamentos de taludes podem ter manifestação de várias formas: durante a construção, causado por infiltrações, deplecionamento do reservatório, defeitos da fundação ou geometrias internas desfavoráveis e abalos sísmicos. Esses fatores ocorrem quando as tensões cisalhantes em uma determinada superfície, ultrapassam a resistência média dos materiais utilizados, que pode ter relação com o desenvolvimento de poropressões ou pressões de percolação elevadas (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998).



**Figura 11:** Modelo de Galgamento em barragem (Mod. PRICE, 2009).

O *piping* constitui um dos mecanismos de acidente mais frequentes em barragens de aterro (Figura 12). São comuns em barragens ou fundações constituídas de solos finos e de baixa coesão, nas quais a água de percolação, ao atingir a superfície, no lado jusante, tende a arrastar as partículas constituintes e iniciar um processo de erosão interna. Essa erosão evolui do ponto de surgência para montante, com tendência de criar um conduto sob a barragem através dela, o que denominou o fenômeno: *piping* ou entubamento (MARQUES FILHO; GERALDO, 1998). Esse fenômeno é o carreamento por percolação de água de partículas de um solo por erosão subterrânea; assim, uma ruptura progressiva de canais dentro da massa de solo, é aberta em sentido contrário ao fluxo d'água.

Quando a base da barragem é constituída por materiais permeáveis perto da superfície, com solo ou rocha de materiais impermeáveis em uma profundidade maior, a infiltração através da camada permeável deve ser reduzida para evitar *piping* e perdas excessivas. Portanto é necessário um estrato impermeável na base da barragem para evitar o rompimento da mesma (TANCHEV, 2014).



**Figura 12:** Modelo de erosão interna (*piping*) em uma barragem (LEWIS, 2014).

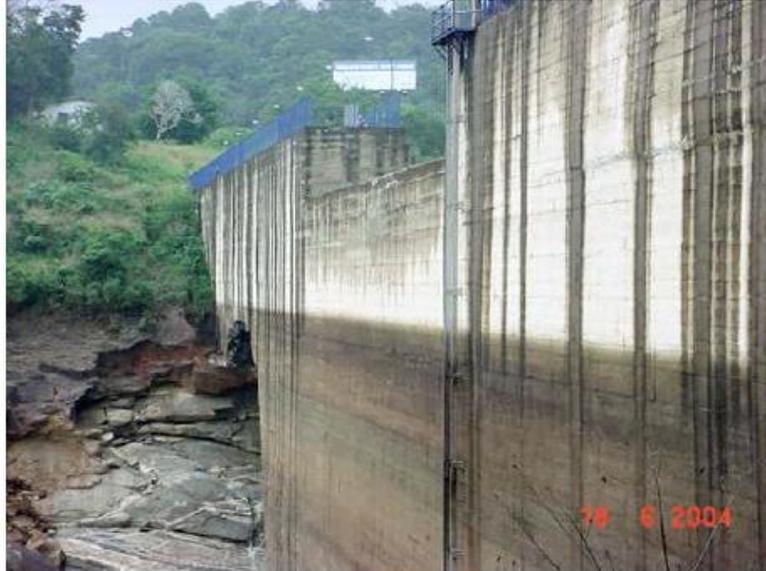
Como exemplo, um caso histórico de rompimento de barragem ocorreu em de junho de 2004, na cidade de Alagoa Nova (PB). Foi um acidente de grandes proporções, devido à tamanha destruição. A Barragem de Camará, localizada no leito do Rio Riachão, com rompeu e alagou parte dos municípios de Alagoa Nova, Areia e os sítios urbanos de Alagoa Grande. Essa barragem tinha características de barragem de terra no projeto original, todavia, por necessidade, foram realizados estudos que viabilizaram esse reservatório para ser uma barragem de concreto compactado. Isso ocorreu devido ao material rochoso em decomposição nas ombreiras (desmoronamento), as jazidas de areia e ao grande desmatamento que a barragem ocasionaria caso continuasse com o projeto inicial.

Os estudos pretéritos realizados na barragem indicaram nas sondagens que o local apresentava blocos de rochas fraturadas que poderiam trazer o desmoronamento da barragem construída, foi solicitada, portanto, a remoção destes blocos. Durante a obra, uma fissura foi averiguada no maciço rochoso que dava suporte a fundação da barragem, a retirada de impurezas que ocupavam o local da fissura foi realizada dando origem assim, a uma barragem do tipo de gravidade em concreto compactado a rolo.

Todos os procedimentos da obra foram realizados até o período das primeiras grandes chuvas em 2004, ano em que houve o rompimento. A razão da ruptura foi estudada por Kanji (2004, p. 1-26) e segundo ele, a mudança do nível d'água (NA) no reservatório, estabeleceu um regime de percolação de água ao longo da zona de cisalhamento, de montante para jusante, com gradativa perda de carga ocasionou o acidente (Foto 4).

O autor do estudo explica que foi uma situação causada pelas peculiares condições geológicas do local, onde a elevada subpressão (resultante das pressões hidrostáticas atuantes sob a laje da rocha, provocada pela variação excessiva do nível de água) e o baixo ângulo de atrito disponível na falha, causaram condições de instabilidade, comprovando que a ruptura foi iniciada na laje a jusante da barragem, o que gerou o seu deslocamento e fraturamento dos blocos.

Portanto, Kanji (2004, p. 1-26) concluiu que a ruptura da laje de rocha à jusante aumentou o gradiente hidráulico (pela diminuição da distância de percolação), intensificando a erosão interna (*piping*) que o solo de preenchimento da falha sob a barragem sofreu, deixando suspenso os blocos presentes. Desta forma, a livre passagem de água sob o bloco de rocha e a alta carga hidrostática atuante teriam finalmente causado a ruptura da fundação da barragem.



**Foto 4:** Face de montante da barragem mostrando ruptura e a clara marca do NA da represa (KANJI, 2004).

#### **4.1 Barragens de Aterro**

Barragens de aterro são o tipo mais comum de estruturas de retenção de água. Podem ser definidas como barragens construídas de material natural obtido a partir de câmaras de empréstimo, situada nas proximidades do local da barragem. O material obtido a partir de escavação de fundações e estruturas anexas também é usado com muita frequência (TANCHEV, 2014).

Devido à complexidade dos problemas que têm de ser resolvidos durante a sua concepção, construção e serviço, as barragens estão dentro das estruturas de engenharia mais complexas. De acordo com Tanchev (2014, p. 121), barragens de terra (ou de aterro) devem satisfazer algumas condições básicas:

- As pistas devem ter inclinações por meio do qual são possíveis fixar a estabilidade da barragem e sua fundação sob as cargas de todas as forças possíveis e influências, ao longo de períodos de construção e de serviços;
- As formações na barragem e sua fundação devem ser mantidas dentro de certos limites aceitáveis, a fim de preservar o bom funcionamento da estrutura;
- A perda de água devido à infiltração através do maciço de terra da barragem e de sua fundação, devem estar situadas dentro de limites aceitáveis. Infiltrações não devem causar de formações ou qualquer tipo de erosão; gradientes hidráulicos, pressão, e as velocidades de

infiltração no maciço de terra e abaixo dela, devem estar dentro de limites permissíveis para materiais relevantes;

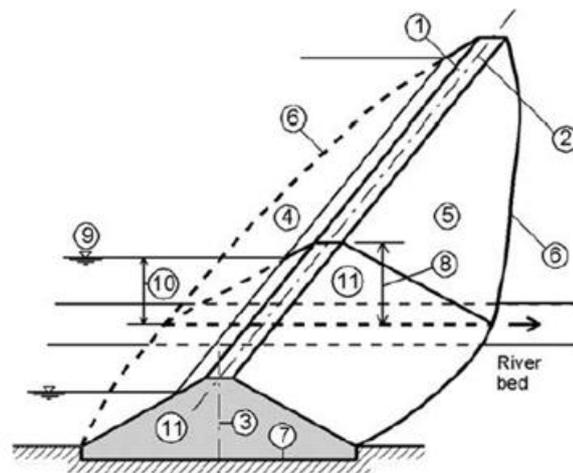
- A crista da barragem deve ser suficientemente elevada acima do nível máximo de água armazenada, de modo a eliminara possibilidade de água que transborda da barragem, é preciso atenção para a altura de ondas, evitando galgamento.

- É necessário que nas encostas e a crista da barragem sejam devidamente alinhados, a fim de fornecer proteção contra a ação das ondas, gelo ou intemperismo;

O DAEE (2006, p 64-96) desenvolveu um guia básico de constução de barragens de pequeno porte. Este guia abrange uma sequencia de etapas desde a outorga para a captação de água, até os procedimentos de construção da barragem, como topografia, posicionamento da crista, altura da barragem, informações quanto ao enchimento, tipos de vertedouro e vazões do reservatório.

A Figura 13 representa a visão de uma barragem de aterro com seus elementos básicos. A crista (1) é o ponto mais elevado da superfície horizontal da barragem; o eixo horizontal (2) é uma linha de simetria da crista no plano de terra, enquanto que o eixo vertical (3) é uma linha contida no meio da crista na seção transversal da barragem. O declive de montante (4) é a face, isto é, o lado da represa, que está voltada para a água, enquanto que a inclinação à jusante (5) é o lado oposto.

Os pilares de uma barragem são as superfícies do vale, para a direita e para a esquerda do leito do rio, em que a barragem é suportada; os contornos (6) são as linhas ao longo das quais estão ligadas as encostas da barragem e do solo; e a fundação (7) é o fundamento sobre o qual a represa é suportada. O corpo de uma barragem é o volume que está confinado dentro da superfície da base, no interior das pistas, bem como no interior da crista; a sua altura (8) é a distância entre o fundo da escavação para a base no leito do rio para a crista da barragem. O nível de cabeceira (9) é o nível de água no reservatório de captação, enquanto que a altura de cabeceira (10) é a diferença entre o nível de água no leito antes da construção da barragem e do nível máximo da água do lago de armazenamento. A seção transversal (11) é qualquer corte vertical, que é perpendicular ao eixo longitudinal da barragem.



**Figura 13:** Elementos básicos de uma barragem de terra (TANCHEV, 2014).

Barragens de aterro são determinadas de várias formas. De acordo com o tipo de material que elas são construídas, as barragens podem ser divididas em: barragens de terra, onde mais de 50% do maciço é construído a partir de materiais de granulação fina de terra-argila, barro, areia ou materiais de areia e cascalho; barragens de terra-rocha, cujo volume do corpo básico é formado a partir de cascalho, ouro, materiais de granulação grossa, enquanto a impermeabilidade à água é fornecida por meio de um elemento feito de material de terra refinado; e barragens de enrocamento, são barragens cujo corpo semelhante ao tipo anterior de barragem, é construído a partir de material de grão grosseiro, impermeabilidade à água, enquanto é conseguida por meio de um elemento feito de material artificial.

Com relação à sua finalidade, barragens de aterro (o mesmo que concreto) são divididas em: as barragens destinadas à elevação do nível de água em um rio; barragens que formam reservatórios com água; as barragens que formam o espaço para a deposição dos resíduos de processos industriais e de mineração. Este último tipo de barragem, é conhecida como uma barragem de rejeito e tem um número de propriedades específicas, ditada pelo tipo de material de resíduos de natureza do processo industrial específico e as condições locais do local da barragem.

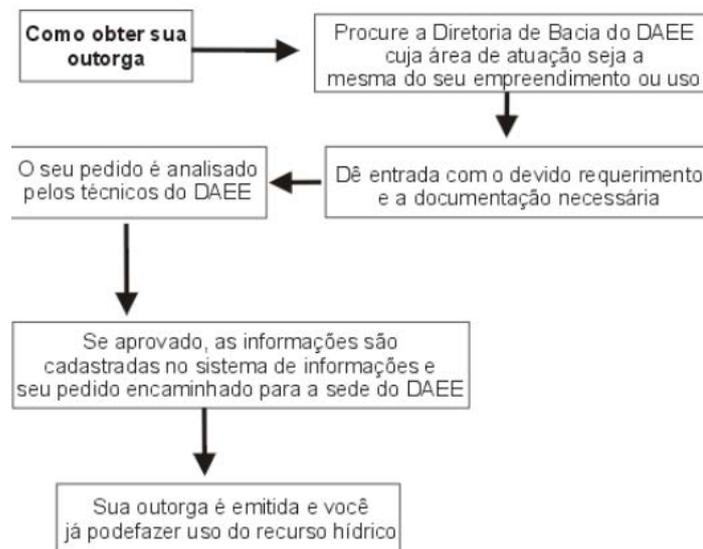
A Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), fundada em Paris em 1928 divide as barragens de acordo ao seu tamanho que podem ser grandes ou pequenas. No grupo das grandes, as barragens são maiores do que 15 metros (TANCHEV, 2014). No Brasil, é o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), estabelece como missão estimular o desenvolvimento, aplicação e a disseminação das melhores tecnologias e práticas da

engenharia de barragens e obras associadas. O CBDB entra no processo como facilitador para garantir que a realização e a operação de barragens e hidrelétricas sejam técnica, ambiental e socialmente adequadas ao máximo benefício da sociedade brasileira (CARVALHO, 2011).

O DAEE estabelece as normas no Estado de São Paulo como poder outorgante, por intermédio do Decreto 41.258, de 31/10/96, de acordo com o artigo 7º das disposições transitórias da Lei 7.663/91. O uso ou interferência nos recursos hídricos nas seguintes formas requerem outorga junto ao DAEE:

Na implantação de qualquer empreendimento que demande a utilização de recursos hídricos (superficiais ou subterrâneos; Na execução de obras ou serviços que possam alterar o regime (barramentos, canalizações, travessias, proteção de leito, etc.); Na execução de obras de extração de águas subterrâneas (poços profundos); Na derivação de água de seu curso ou depósito, superficial ou subterrâneo (captações para uso no abastecimento urbano, industrial, irrigação, mineração, geração de energia, comércio e serviços, etc.); No lançamento de efluentes nos corpos d'água.

Para realização de uma outorga para uso da água e construção das barragens é necessário cumprir alguns procedimentos (Fluxograma 1):

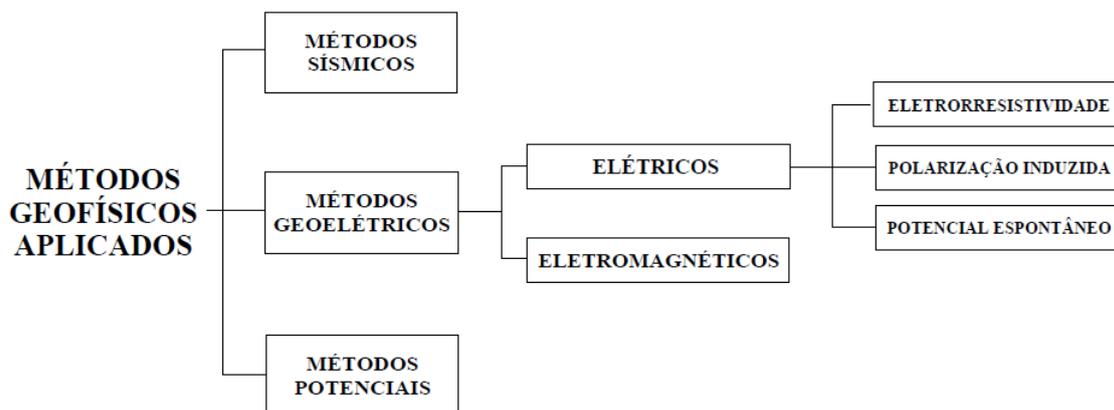


**Fluxograma 1:** Procedimentos de outorga para uso de recursos hídricos de acordo com o DAEE

Informações mais detalhadas acerca da documentação de outorga que sobre os procedimentos a serem realizados podem ser obtidas junto ao DAEE.

## 5. MÉTODOS GEOFÍSICOS

A geofísica é uma área do conhecimento que tem por objetivo a investigação da subsuperfície, por meio de medida indiretas (diretas em alguns métodos), que são geralmente realizadas em zonas de superfície. No geral, estas medidas são tomadas com a aplicação de uma determinada propriedade física no meio investigado, sendo que o retorno do levantamento está condicionado à existência de contrastes dos valores da grandeza física mensurada, com exceção dos métodos potenciais, onde a aplicação de determinada propriedade ocorre naturalmente. A geofísica é composta de diferentes métodos que são classificados de acordo com a propriedade física que investigam, onde alguns métodos se destacam na investigação (Figura 14).



**Figura 14:** Lista Simplificada dos Métodos Geofísicos utilizados em investigações (GANDOLFO, 2007).

A geofísica é amplamente utilizada na investigação geológica. Os autores Fell et al. (1992, p. 164-210) e Price (2009, p. 159-207) dissertam sobre os métodos mais comuns utilizados em geologia de engenharia, especificamente no âmbito das barragens, que são:

- Refração Sísmica (Utilização das ondas P e S)
- Reflexão Sísmica
- Eletorresistividade (utilizado neste trabalho)
- GPR (Ground penetration radar)
- Potenciais (Magnéticos e Gravimétricos)

## 5.1 Princípios Teóricos dos Métodos Geométricos

O nome elétrico deriva da palavra grega âmbar ("elektron"). Carga elétrica - em conjunto com a massa, comprimento e tempo – é uma propriedade fundamental da natureza. O cientista Charles Augustin de Coulomb estabeleceu leis que descrevem a relação da força de atração ou repulsão entre duas esferas carregadas que foram proporcionais ao produto das cargas elétricas individuais e inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre os centros das esferas. Sua lei pode ser escrita como a seguinte equação:

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ (Equação 1)}$$

A unidade de carga é o coulomb (C), definida como a quantidade de carga que passa por um ponto em um circuito elétrico quando uma corrente elétrica de um ampère (A) flui por um segundo (isto é, 1C= 1A s). Por sua vez, o ampère é definido a partir dos efeitos magnéticos de uma corrente. Quando a corrente passa na mesma direção através de dois longos condutores retos e paralelos, campos magnéticos são produzidos em torno dos condutores, os quais fazem com que eles se atraiam. Se a corrente flui através dos condutores em direções opostas se repelem entre si. A amperagem é definida como a corrente que produz uma força de  $2 \times 10^{-7}$  N por metro de comprimento entre condutores infinitamente longo e fino, que são um metro de distância no vácuo. Assim, a unidade de carga é definida com precisão, indiretamente. No Sistema Internacional de unidades (SI) K é escrito como  $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$ , de modo que a lei de Coulomb torna-se:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ (Equação 2)}$$

A força exercida sobre a unidade de carga elétrica por outra carga Q é chamado o campo elétrico da carga Q. Assim, se deixarmos  $Q_1 = Q$  e  $Q_2 = 1$  na equação será obtida a equação para o campo elétrico e a uma distância r de uma carga Q:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \text{ (Equação 3)}$$

De acordo com esta definição, são dadas as dimensões newton /coulomb ( $\text{NC}^{-1}$ ).

Como exemplo, a uma distância infinita positiva da carga  $Q$ , a força repulsiva sobre uma unidade de carga positiva é zero; mas, a uma distância  $r$ , é dada pela equação. A energia potencial da unidade de carga em  $r$  é chamada de potencial elétrico em  $r$ ; nomeada de  $U$ . As unidades de  $U$  são energia por unidade de carga, ou seja, joules/coulomb. Se mover uma distância  $dr$  contra o campo  $E$ ; as possíveis mudanças por uma quantidade  $dU$  igual ao trabalho feito contra a  $E$ , o que é  $(- E dr)$ . i.e.,  $Du = - E dr$ , de modo que:  $E = - \frac{dU}{dr}$

Por integração calcula-se o potencial elétrico  $U$  em  $r$ :

$$U = - \int_{\infty}^r E dr = - \int_{\infty}^r \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr \text{ (Equação 4)}$$

A partir do qual:

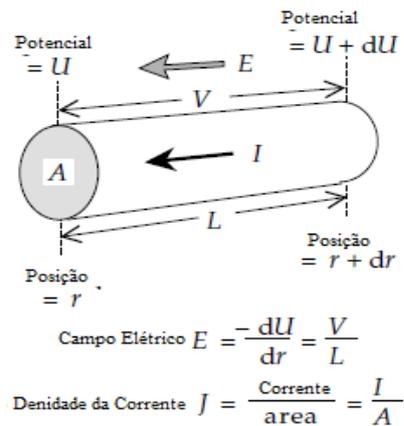
$$U = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \text{ (Equação 5)}$$

O cientista alemão Georg Simon Ohm, estabeleceu em 1827 que a corrente elétrica  $I$ , em um fio condutor, é proporcional a diferença de potencial  $V$  através dele. A relação linear é expressa pela equação:  $V = IR$  onde  $R$  é a resistência do condutor com unidade dada Ohm.

Formulado mais precisamente, para um dado material, a resistência é proporcional ao comprimento  $L$  e inversamente proporcional à área de secção transversal  $A$  do condutor (Figura 15).

As observações experimentais em diferentes fios do mesmo material mostraram que um fio longo tem uma resistência maior do que um fio de curto. Para um dado material a resistência é proporcional ao comprimento  $L$  e inversamente proporcional à área de secção transversal  $A$  do condutor. Essas relações podem ser expressas pela equação:

$$R = \rho \frac{L}{A} \text{ (Equação 6)}$$



**Figura 15:** Parâmetros usados para definir a lei de Ohm para um condutor linear (Mod. LOWRIE, 2007).

A constante de proporcionalidade  $\rho$  é a resistividade do condutor. É uma propriedade física do material do condutor, o qual expressa a sua capacidade de se opor a um fluxo de carga. O inverso de  $\rho$  é chamado de condutividade do material ( $\sigma$ ). A unidade de resistividade é o ohm/metro ( $\Omega \text{ m}$ ); a unidade de condutividade é o recíproco ohm-metro ( $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ ). Se substituirmos a equação e reorganizá-la os termos obtemos a seguinte expressão:

$$\frac{V}{L} = \rho \frac{I}{A} \text{ (Equação 7)}$$

A relação  $V / L$  do lado esquerdo desta equação é, por comparação com o campo elétrico  $E$  (assumindo o gradiente de potencial de ser constante ao longo do comprimento do condutor). A razão  $E / A$  é a corrente por unidade de corte transversal área do condutor; chama-se densidade de corrente e é denotado por  $J$ . Portanto é possível reescrever a lei de Ohm como:

$$E = \rho J \text{ (Equação 8)}$$

Essa forma é útil para calcular as fórmulas utilizadas em métodos de resistividade de levantamento elétrico (LOWRIE, 2007).

### 5.1.1 Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método de exploração geofísica que investiga variações de resistência elétrica, fazendo com que uma corrente elétrica flua através do solo com o uso de cabos conectados eletrodos. A resistência elétrica depende das propriedades do solo podendo ser influenciado pela a quantidade da água subterrânea presente com a quantidade de sais dissolvidos na mesma.

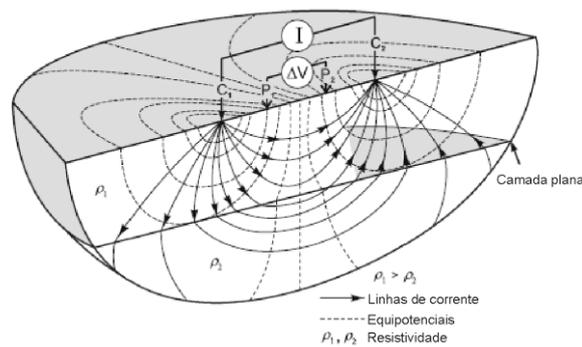
O método da eletrorresistividade emprega uma fonte artificial de corrente elétrica (I) contínua ou de frequência baixa, que é introduzida no solo por intermédio de um par de eletrodos. A diferença de potencial estabelecida, ocorre em resposta a esta injeção a medição é realizada por meio de outros dois eletrodos situados nas zonas superficiais (TELFORD et al., 1990) (Figura 16).

O potencial elétrico ( $\Delta V$ ) produzido pela passagem deste campo em subsuperfície é captado por meio de um circuito receptor e medido por auxílio de um voltímetro. A aplicação da Lei de Ohm ( $V=IR$ ) considerando o espaçamento entre os eletrodos, representado por um fator denominado K, permite medidas do parâmetro resistividade aparente ( $\rho_a$ ) para vários níveis de profundidade que dependem somente da geometria relacionada à disposição dos eletrodos (Equação 9).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \Omega m \text{ (Equação 9)}$$

A equação que fornece o potencial devido a uma única fonte pontual de corrente, pode ser deduzida a partir de duas considerações básicas: a lei de Ohm e a condição de divergência (KELLER; FRISCHKNECHT, 1966).

Resistividade aparente tem uma grande utilidade em aplicações práticas do método, pois é um parâmetro que pode apresentar variações ao longo de uma seção, sendo diagnóstico da presença de heterogeneidades elétricas resistivas ou condutivas. O padrão das resistividades aparentes associadas a uma determinada estrutura em subsuperfície é geralmente complexo e pode não corresponder à distribuição dos valores de resistividade elétrica “verdadeira” (GANDOLFO, 2007). O subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a quantia medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície relativamente grande, portanto ao se efetuar os cálculos pertinentes obtém se uma resistividade aparente ( $\rho_a$ ) (BRAGA, 2007).



**Figura 16:** Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos (Adaptado KNÖDEL, 2007).

A resistividade aparente é expressa em ohm.m, da mesma forma que a resistividade verdadeira. Ela constitui a base para interpretação dos dados de eletroresistividade. Em um modelo homogêneo os valores são iguais. O parâmetro resistividade depende da natureza e do estado físico do material analisado. A resistividade e a condutividade elétrica estão relacionadas aos mecanismos de propagação de corrente elétrica dos materiais, condicionadas em materiais geológicos a processos de condutividade eletrônica ou eletrolítica (KELLER; FRISCHKNECHT, 1966).

Os principais usos da resistividade no âmbito geológico são, portanto, mapear a presença de rochas de porosidades diferentes, particularmente no contexto com hidrogeologia, para a detecção de aquíferos e de contaminação. No solo e nas rochas, a resistividade depende de alguns fatores determinantes como porosidade, composição mineralógica, grau de saturação, resistividade do fluido, que preenchem vazios (concentração dos sais dissolvidos) e formam as partículas sólidas.

Tradicionalmente, são utilizadas diferentes técnicas para determinar a estrutura vertical e/ou a variação lateral em uma investigação de subsuperfície. É comum o uso de termos praticamente sinônimos, que ainda causam divergência no meio científico quanto às particularidades de cada um, porém houve preferência do uso do termo tomografia elétrica neste trabalho, devido ao conjunto dos resultados obtidos.

A tabela abaixo (Tabela 2) fornece valores imprecisos, em questão de medições de campo, de resistividades de rochas e minerais que são fundamentais na área de estudo:

| <b>Rocha/minerais</b> | <b>Resistividade (ohm-m)</b> |
|-----------------------|------------------------------|
| Argila                | 1–100                        |
| Basalto               | 10–10 <sup>7</sup>           |
| Água Natural          | 1–10 <sup>3</sup>            |

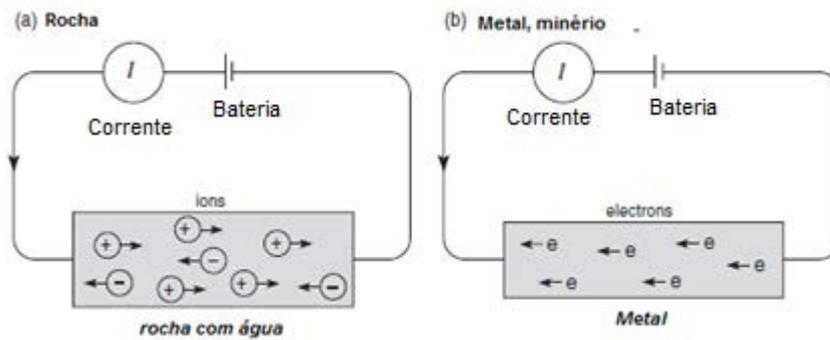
**Tabela 2:** Valores de resistividade aproximada segundo Mussett e Khan (2000, p. 183).

A propagação da corrente elétrica nesses materiais pode ocorrer através de dois mecanismos de condução: condução eletrônica (pela matriz da rocha), iônica ou eletrolítica (através de íons contidos na água, presentes nos poros interconectados, fissuras e/ou fraturas nos materiais rochosos). Esses meios de condução são descritos com mais detalhe no item a seguir.

Solos com texturas mais finas apresentam a tendência de conduzir melhor a corrente elétrica. Como exemplo, a argila em relação à areia, pela função que suas partículas mantêm a água por adesão em situações com baixa concentração de sais. Solos superficiais apresentam variação de resistividade devido à compactação e a alteração do teor de umidade do solo.

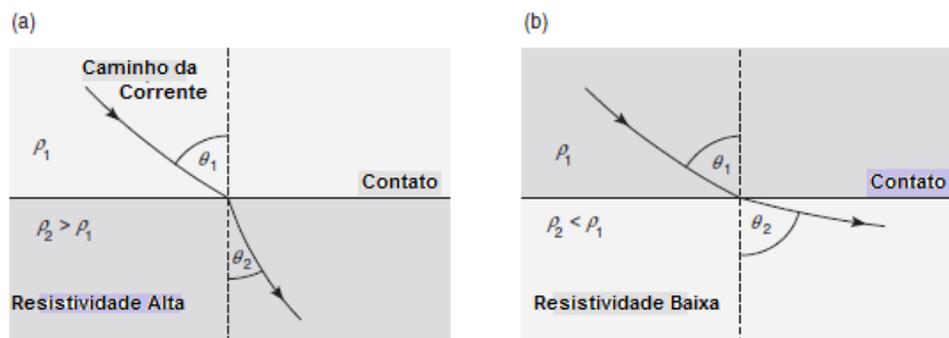
A maioria dos minerais que formam as rochas são bons isolantes, mas rochas e seus produtos de alteração, como solos, contêm poros e fissuras, que geralmente apresentam uma película de água sobre as suas superfícies e frequentemente estão saturadas. As águas subterrâneas têm uma resistividade relativamente baixa; a resistividade do solo/rocha depende principalmente, da sua porosidade e da relação entre poros e a água. Também depende do condutor e da sua íntima relação com a água.

Por exemplo, a água pura é um bom isolante, mas águas naturais contêm sais dissolvidos de vários tipos, geralmente derivados do intemperismo de rochas; os sais se dissociam em íons positivos e negativos, que são átomos ou grupos de átomos que têm perda ou ganhos de um ou mais elétrons. Estes íons podem se mover através da água, em direções opostas, e assim pode formar uma corrente. Isto é chamado de Condução Iônica, que é diferente da condução eletrônica, onde a corrente é devida somente aos elétrons (Figura 17 a e b). A condução eletrônica ocorre em alguns metais e minérios. Na área de estudos, por exemplo, ocorre a presença de magnetita no solo de composição basáltica, acontecendo portanto, os dois tipos de conduções supracitadas.



**Figura 17:** Condução de elétrica em metais e rochas (MUSSET; KHAN, 2000, p 184).

Na penetração da corrente em subsuperfície, há diferença de propagação de acordo com os meios que essa corrente atravessa. Como exemplo, há distorção do campo elétrico no contato da fração solo-rocha. O que pode explicar esse fenômeno é a tendência de ocorrer refração da corrente dentro de uma camada uniforme. Essa corrente se desvia, encurvando ou refratando, quando há passagem por interfaces que se separaram e apresentam diferentes resistividades. Há, portanto, refração quando ocorre o cruzamento das correntes de rocha/solo de maior resistividade para menor resistividade e vice-versa (Figura 18).



**Figura 18:** Refração das correntes (MUSSET; KHAN, 2000).

No caso da área de estudos, como envolve apenas perfis de alteração de solo, é possível fazer a analogia com o exemplificado acima, com a diferença de resistividade de solo seco (alta resistividade) e solo úmido (baixa resistividade). Diante da premissa que a área de estudos é composta por solo argiloso e compõe o maciço compactado da barragem além de que há uma eventual tendência de infiltração de água na mesma, além da presença de água meteórica que pode influenciar. Porém as etapas de campo e aquisição de dados foram realizadas em períodos com chuvas escassas na região da área de estudo (vide Tabela 1).

A refração da corrente gera contraste no limite do maciço de terra e o embasamento compostos por rochas da Formação Serra Geral. Outra grande zona de contraste refrativo é encontrada em áreas com zonas de solo seco do maciço compactado e eventuais zonas de infiltração de água. Isso, portanto, possibilitará as interpretações geofísicas cabíveis da área de estudo.

## **5.2 Técnicas de Aquisição**

### **5.2.1 Tomografia Elétrica**

A técnica de tomografia elétrica está baseada na realização de medidas de resistividade aparente ao longo de uma linha, com o objetivo de investigar variações em um ou mais níveis em profundidade (SHERRIF, 1989) (Figura 19).

Esta técnica é aplicada em situações onde o objetivo da pesquisa tem foco em determinar discontinuidades laterais nos materiais geológicos, tais como sills, diques, contatos geológicos, fraturamentos e falhamentos, corpos mineralizados, mapeamento de plumas de contaminação entre outras (BRAGA, 2007). Apesar da mesma utilidade, como já mencionado, há diversos termos sinônimos para a mesma técnica de aquisição, como exemplo, Braga (2007) prefere a utilização do termo caminhamento elétrico, outros autores já preferem o termo imageamento elétrico. Alguns autores afirmam que teoricamente em uma aquisição tomográfica são obtidos apenas resultados em três dimensões, diferentemente dos outros termos citados, os quais fornecem resultados bidimensionais. A preferência pela utilização deste termo foi devido aos resultados gerados após os tratamentos dos dados nos softwares.

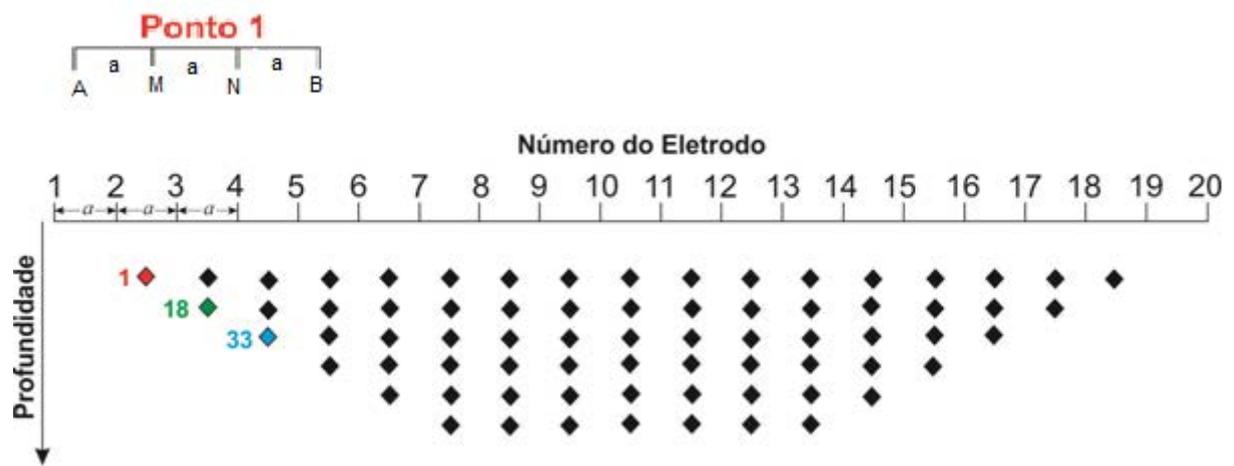
Para a obtenção dos resultados em qualquer técnica é necessário a utilização de arranjos específicos que forneçam resultados coerentes ao que se está investigando. Sobretudo no caso deste trabalho, com a tomografia elétrica, o arranjo que melhor se enquadrava ao estudo foi o arranjo Wenner.

### **5.2.2 Arranjo Wenner**

Como mostrado, a resistividade depende de um fator geométrico (nomeado de  $K$  que depende do espaçamento dos eletrodos). Esse fator é tal que, para a subsuperfície uniforme,

$\rho_a$  permanece constante à medida que a separação é alterada e é igual à resistividade do solo. O fator depende da matriz específica utilizada.

No Arranjo Wenner, são utilizados quatro eletrodos, que são igualmente espaçados e o fator geométrico é  $2\pi a$ , assim:  $\rho_a = 2\pi a \Delta V / I$ . Caso o subsolo for constituído de camadas, o valor  $\rho_a$  depende das resistividades das várias camadas. Durante o ensaio, são deslocados simultaneamente, mantendo a relação:  $AM=MN=NB=a$ , e o centro do arranjo permanece fixo (Figura 19).



**Figura 19:** Arranjo de eletrodos Wenner e a sequência de medidas utilizadas para a construção de uma pseudosseção (mod. BORGES, 2007).

Com as técnicas são obtidos resultados que são base para interpretação. Pseudosseções são resultados iniciais obtidos da aquisição geofísica que fornecem valores qualitativos das investigações. As pseudosseções quando processadas em softwares específicos, fornecem resultados mais qualitativos e também quantitativos. As interpretações são baseadas nas pseudosseções e nas imagens geradas do processamento que são obtidos através delas gerando assim os modelos de inversão.

## 6 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os ensaios geofísicos de campo foram realizados com o resistivímetro Terrameter LS fabricado pela empresa sueca ABEM (Foto 5). Este equipamento possibilita medições de resistividade, cargabilidade e potencial elétrico natural, com a possibilidade de efetuar medidas por meio de distintos arranjos. É composto dos materiais necessários para realização de pesquisas geoeletricas.



**Foto 5:** Aparelho geofísico Terrameter LS durante a aquisição dos dados

O resistivímetro Terrameter LS é conectado a uma bateria portátil e realiza ensaios cujo valor da corrente elétrica é induzido artificialmente no subsolo, gerando um campo elétrico artificial. Como acessórios, foram utilizados fios de conexão, trenas não metálicas e eletrodos metálicos para o envio de corrente e leitura do potencial. O aparelho faz a leitura do potencial elétrico no local dos eletrodos cravados. Ao salvar os dados na forma de frequência de onda, o aparelho permite identificar se há ocorrência de ruídos excessivos. Instalações elétricas e objetos metálicos em contato com o solo podem perturbar as medições e criar ruído, prejudiciais no resultado dos ensaios (ABEM, 2011).

Por vezes, como o solo apresentou elevada resistência de contato, foi necessário colocar água nas proximidades dos eletrodos, para obtenção de melhores resultados das leituras geofísicas. Essa resistência ocorre devido ao mau contato, entre eletrodo e solo, que pode possuir características intrínsecas, sobretudo em solo extremamente seco com a presença

de seixos e raízes, que podem ocasionar em dados imprecisos. Isso afeta tanto o circuito de emissão de corrente quanto o circuito de recepção de potencial, o que pode inviabilizar o trabalho (BRAGA, 2007).

Na aquisição em campo, foram cravados no solo eletrodos com equidistância de cerca de 2 metros em perfil, estabelecidas sobre o maciço de terra que coincide com uma via rural para transito de veículos. Esta extensão apresentava cerca de 130 metros disposta no rumo Nordeste-Sudoeste.

Os cabos com os eletrodos do aparelho geofísico foram distribuídos ao longo do maciço de terra (corpo da barragem) em três etapas de aquisições realizadas uma após outra com equidistância de 6 metros entre linhas (Figura 20), nesta ordem:

- Linha com disposição à jusante
- Linha com disposição dos fios no central
- Linha de disposição dos fios à montante



**Figura 20:** Área da barragem com a disposição das três linhas de aquisição



**Foto 6:** Distribuição dos eletrodos na borda da barragem de terra

Para aquisição dos dados há injeção de corrente elétrica no subsolo, que cria potenciais de maneira artificial, onde estes se relacionam com as características do local e as propriedades físicas do material.

O resistivímetro depois da aquisição permite a visualização de pseudosseções que foram tratados posteriormente na etapa tratamento de dados geofísicos.

Com os dados obtidos foi possível a análise e a interpretação dos dados geofísicos para análise da relação da água com solo, que possibilitam as conclusões deste trabalho quanto à resistividade e condução elétrica em locais específicos.

### **6.1 Tratamento dos dados geofísicos**

Os dados obtidos no campo para aquisição de dados geofísicos foram transferidos para computador e processados no software RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE, 2010). Esse programa é utilizado no meio técnico-científico e acadêmico por diversas universidades e empresas de geofísica.

Desta forma foi possível o tratamento desses dados e a obtenção de modelos de inversão, em duas dimensões, distância x profundidade em termos de resistividade elétrica com intuito da otimização dos resultados (LOKE; BAKER, 1996).

Esse programa é projetado para processamento de grandes conjuntos de dados em duas dimensões. O processo de inversão consiste em uma série de blocos retangulares; a disposição dos blocos é ligada à distribuição dos pontos dos dados na pseudosseção, ou seja, seção gerada pelos dados de campo em profundidade teórica (LOKE; BAKER, 1996).

Os dados devem ser coletados de tal forma que os eletrodos estejam alinhados e o espaçamento entre eletrodos adjacentes, seja constante. O programa aceita dados obtidos com diversos tipos de arranjos. O programa permite a inserção de dados de topografia, fator que deve ser considerado desde que existam variações significativas ao longo da linha do levantamento, no entanto tal fator não foi utilizado neste trabalho.

No RES2DINV, a utilização de células com largura igual a meio espaçamento entre eletrodos na malha de elementos finitos, fornece resultados mais precisos no cálculo das resistividades do modelo (GANDOLFO, 2007, GEOTOMO SOFTWARE, 2010). Esse programa adota os coeficientes empíricos na plotagem dos pontos com relação às profundidades de acordo com o arranjo utilizado (EDWARDS, 1977).

A distribuição e tamanho dos blocos (modelos de discretização) são gerados automaticamente pelo programa conforme a distribuição dos pontos de dados. A profundidade da linha inferior dos blocos é definida para ser, aproximadamente, igual à profundidade equivalente de investigação de pontos com o maior espaço entre eletrodos (EDWARDS, 1977).

A sub-rotina de modelagem direta é usada para calcular os valores de resistividade aparente e uma técnica de otimização não-linear por mínimos quadrados, que é usada para a rotina de inversão (DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE 1990, LOKE; BARKER, 1996). O resultado pode ser apresentado sob a forma de seção com distância versus profundidade, em termos de pseudosseção, seção calculada e modelo de inversão.

Os dados gerados após a inversão 2D foram reunidos em um único arquivo, mais tarde usado como um banco de dados para a geração de modelos 3D e mapas de profundidade. Este processo foi desenvolvido na plataforma Oasis Montaj, onde os dados obtidos em 2D no programa RES2DINV foram interpolados e modelados utilizando o método de Krigagem (inverso do quadrado da distância), para o realce de valores extremos em um modelo de blocos tridimensionais.

Neste trabalho serão apresentados os modelos de inversão em cada uma das aquisições (três linhas, do campo de aquisição de dados) e uma geral com as três linhas juntas.

## 7 RESULTADOS

Com o processamento dos dados foram obtidos pseudosseções e modelos de inversão que permitiram a análise da resistividade e a condutividade elétrica do solo no maciço de terra.

Os dados de campo, com o auxílio do aparelho geofísico utilizado, gerou resultados instantâneos após as medições na forma de pseudosseções de resistividade elétrica aparente, que é um processo bastante comum e utilizado para visualização dos dados. A pseudosseção representa um eficiente modo de visualização dos dados, possibilitando em boa parte das vezes, interpretações qualitativas.

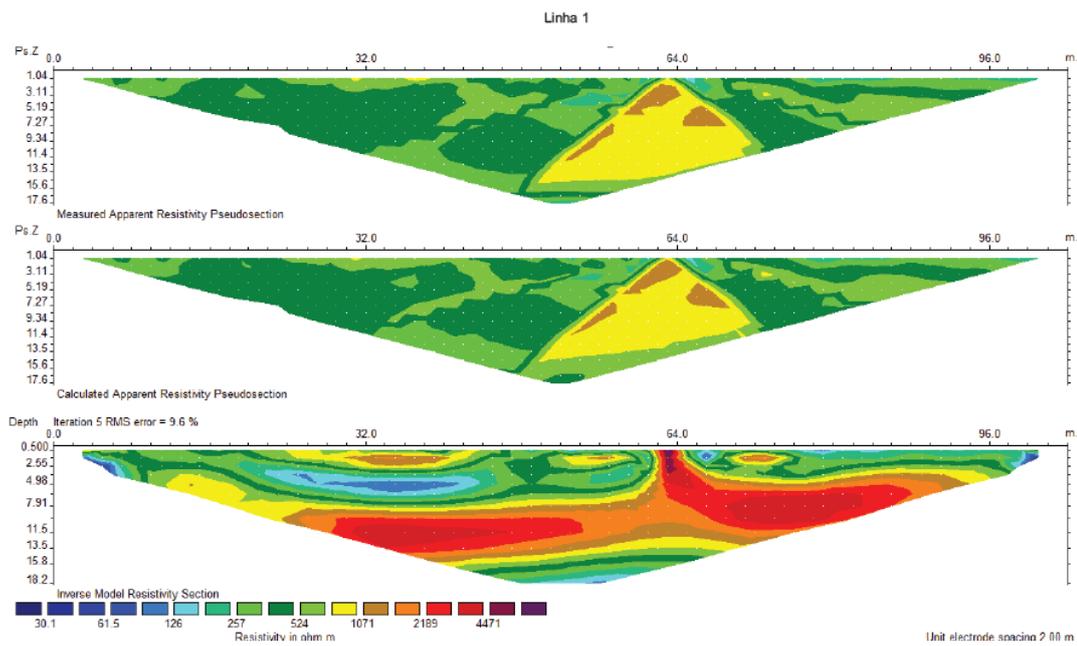
São representativos na figura a extensão lateral da linha (em metros), valores de profundidade alcançada (em metros), valores de resistividade aparente e resistividade (em ohm.m), apresentados por meio de cores com diferentes tonalidades.

As cores frias (tons em azul) representam valores de baixa resistividade, portanto de alta condutividade elétrica. As cores com tonalidade esverdeadas e amareladas são as que representam valores intermediários de resistividade. Já as cores quentes (laranja e tons de vermelho e roxo) significam valores com alta resistividade.

Em cada uma das linhas de aquisição, foram geradas duas imagens de pseudosseções: uma de medida de resistividade aparente e outra também de resistividade aparente, no entanto, já com cálculos primários realizados pelo software RES2DINV. E com a otimização dos resultados, houve o realce dos dados e com isso foram gerados os modelos de inversão das linhas.

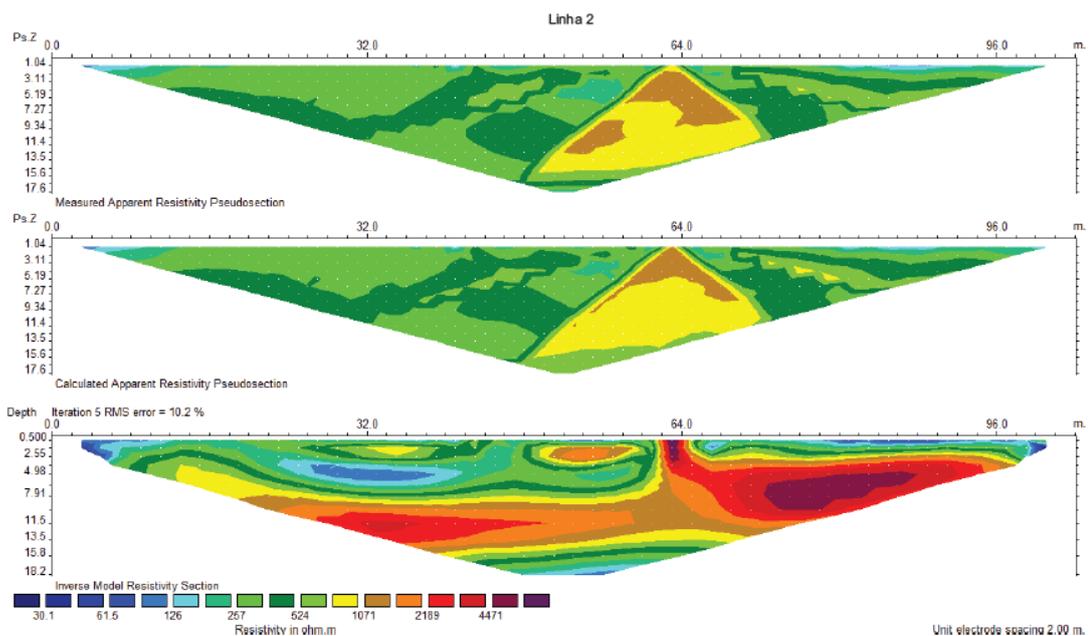
Cabe ressaltar que estes dados são fornecidos inicialmente em duas dimensões (2D) e teoricamente, uma aquisição tomográfica fornece teoricamente dados em três dimensões (que serão mostrados a posteriormente). Para esta primeira aquisição, poderiam ser utilizados outros termos, como já discutido anteriormente no trabalho (vide Métodos Geofísicos).

A primeira linha de aquisição, Linha 1 (Figura 21) É uma linha que representa as medições realizadas a jusante, que se encontra mais distante em relação às outras, do contato com a água. A linha tem aproximadamente 100 metros de extensão lateral e profundidade alcançada pela técnica da tomografia elétrica do método geofísico entre 17 a 19 metros.



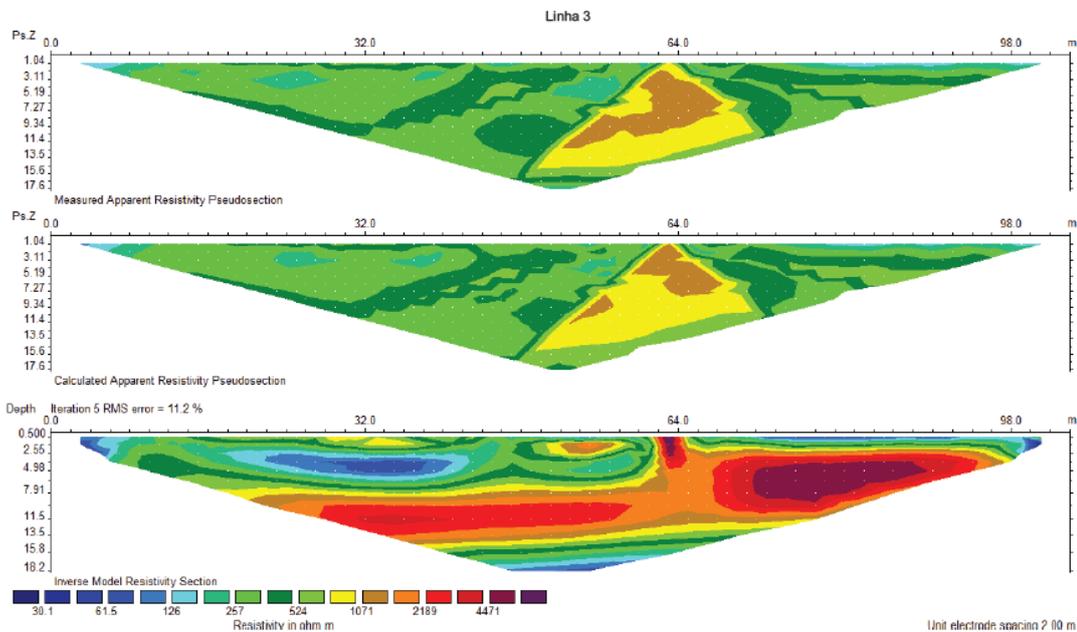
**Figura 21:** Pseudosseções e Modelo de inversão de inversão da linha 1 da seção de Resistividade.

A segunda de aquisição, Linha 2 (Figura 22) é a linha das medições de aquisição tomográfica que se encontrava na zona central do maciço de terra. Da mesma forma que a primeira, esta linha tem aproximadamente 100 metros de extensão lateral e profundidade teórica alcançada pela tomografia elétrica entre 17 a 19 metros.



**Figura 22:** Pseudosseções e Modelo de inversão de inversão da linha 2 da seção de Resistividade

De semelhante forma, na terceira linha de aquisição, como nas outras duas, foi gerado novas pseudosseções e um novo modelo de inversão, Linha 3 (Figura 23). A linha se encontra a montante (próximo do contato da barragem com a água). A linha tem aproximadamente a mesma dimensão das outras.



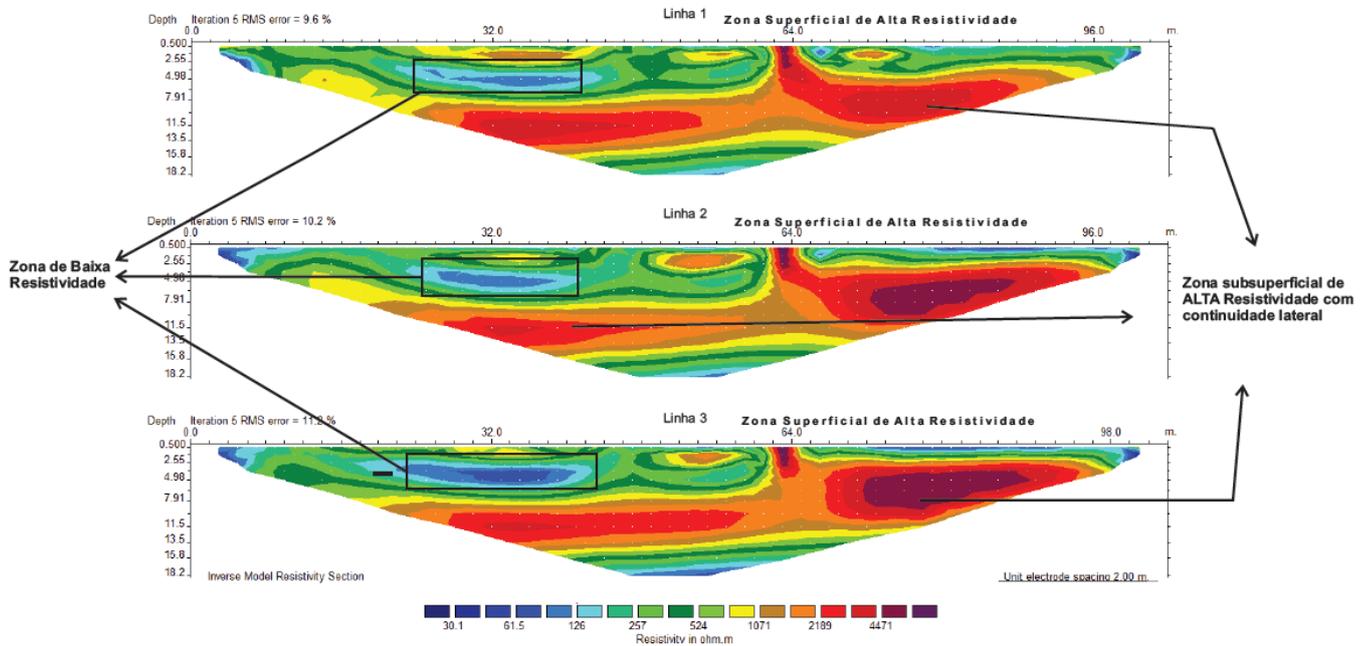
**Figura 23:** Pseudosseções e Modelo de inversão de inversão da linha 3 da seção de Resistividade

As três linhas, como esperado, apresentam resultados semelhantes. Na figura são apresentadas duas pseudosseções: a primeira da medida de resistividade aparente e a outra de resistividade aparente calculada. Com cálculo das pseudosseções os modelos de inversão podem ser gerados, como visto na imagem mais abaixo.

As pseudosseções apresentam zonas com tons esverdeados, verde claro e verde escuro, com maior significância para os tons escuros entre 0 e 50 metros de profundidade e entre 0 e 10 metros, significando valores intermediários, variando entre 257 Ohm.m e 750 Ohm.m. Essas medidas são representativas em valores de resistividade aparente. Nas pseudosseções aparecem um tom amarelado representativo, encontrado lateralmente entre 50 e 65 metros. Da mesma forma, também aparecem um tom amarelado representativo, encontrado lateralmente entre 50 e 65 metros, que coincide com o vertedouro que existe nesta posição da barragem.

Com os modelos de inversão gerados nas três linhas (Figura 24) é possível ver que estas apresentaram uma zona de baixa resistividade na mesma extensão lateral e profundidade, porém em diferentes locais da estrutura, o que permite afirmar que essa zona de baixa resistividade é restrita, porém apresenta continuidade transversal. A mesma coisa pode se

dizer da contínua zona de alta resistividade abaixo, no entanto, esta não é restrita, apresentando continuidade lateral como uma camada.



**Figura 24:** Modelos de inversão das linhas 1,2 e 3 da seção de Resistividade.

Os modelos de inversão obtidos nas linhas de aquisição apresentam valores variados quanto à resistividade. As medidas com alta resistividade variam entre 1600 Ohm.m e 4000 na linha um e até, acima de 4471 Ohm.m nas linhas 2 e três de aquisição, onde tons laranja-avermelhados encontrados abaixo da profundidade de 5 metros são representativos. A partir de 6 metros de profundidade, uma zona de alta resistividade com continuidade lateral é marcante. Tem grande importância esta zona neste trabalho podendo representando blocos de rochas enterrados.

Cabe ressaltar que os tons avermelhados entre 60 e 65 metros são valores altamente resistivos devido à existência de um vertedouro de água da barragem neste ponto (Foto 7). A água fluía da barragem em vazão baixa, de montante para jusante. Esta estrutura está enterrada no maciço de terra da barragem e foi captado nas três linhas de aquisição, comprovando assim, sua continuidade transversal.



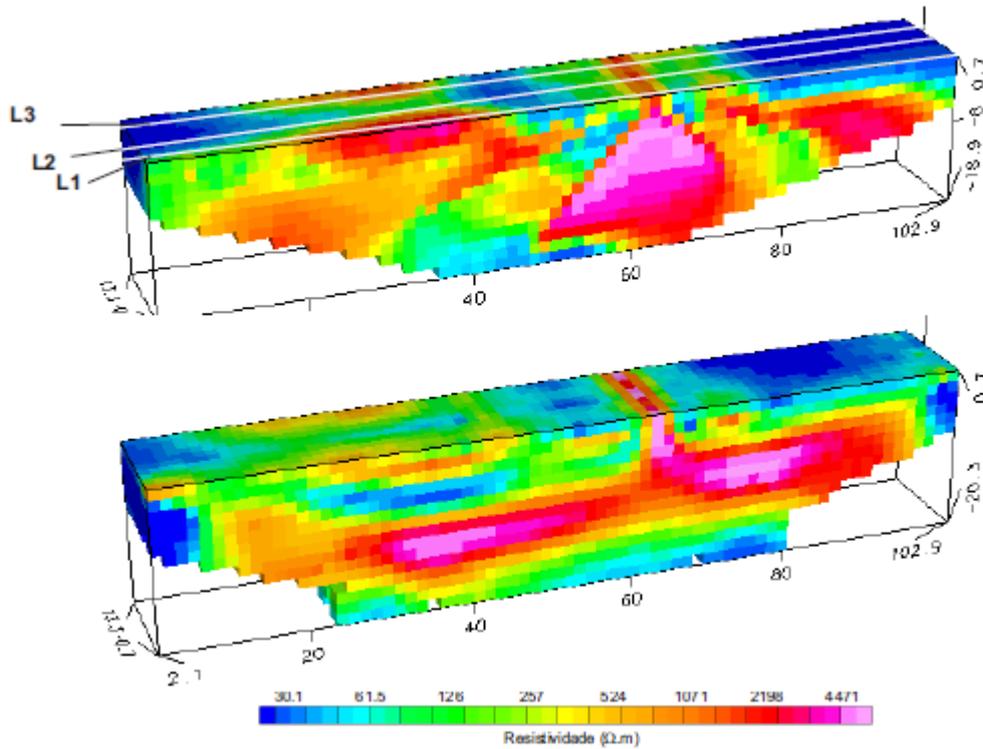
**Foto 7:** Vertedouro de água da barragem na altura de 64 metros da linha de aquisição geofísica.

Nas proximidades do vertedouro, próximo à superfície há presença de uma pequena zona de baixa resistividade, que pode ser interpretada como água de superfície, ou até mesmo um pequeno vazamento das águas que vertem pela estrutura. Da mesma forma que pontos isolados com outras zonas de baixa resistividade aumentam sua representatividade. Tais como a zonas entre 4 e 8 metros da seção e profundidade aproximada de 2 metros e a zona de maior extensão entre 66 e 100 metros com profundidade de 1 metro. Como interpretação, o solo poderia estar em um local de maior umidade.

Os tons amarelados encontrados em pontos escassos próximos a superfície, representam uma resistividade intermediária. O solo é argiloso, que teoricamente possui uma baixa resistividade, porém encontrava-se muito seco no dia das aquisições geofísicas aumentando de certa forma sua resistividade.

Ainda no modelo de inversão, a linha de aquisição entre 22 e 42 metros da seção e com profundidade entre 2,5 metros e 5 metros mostra uma zona que contém tons azulados, representando, portanto, local de baixa resistividade. Outras zonas também apresentam baixos valores de resistividade, no entanto, não são tão representativas. Como interpretação, esse local pode ser uma eventual zona de percolação de água.

A partir da integração modelos de inversão bidimensionais (2D) foi possível gerar blocos representativos do maciço de terra que compõe a barragem em modelos tridimensionais (3D). A figura 25 apresenta dois blocos: uma pseudosseção em bloco tridimensional e um modelo de inversão obtido através das três linhas na aquisição de dados geofísicos, descritas nas pseudosseções e modelos de inversão bidimensionais citados acima.



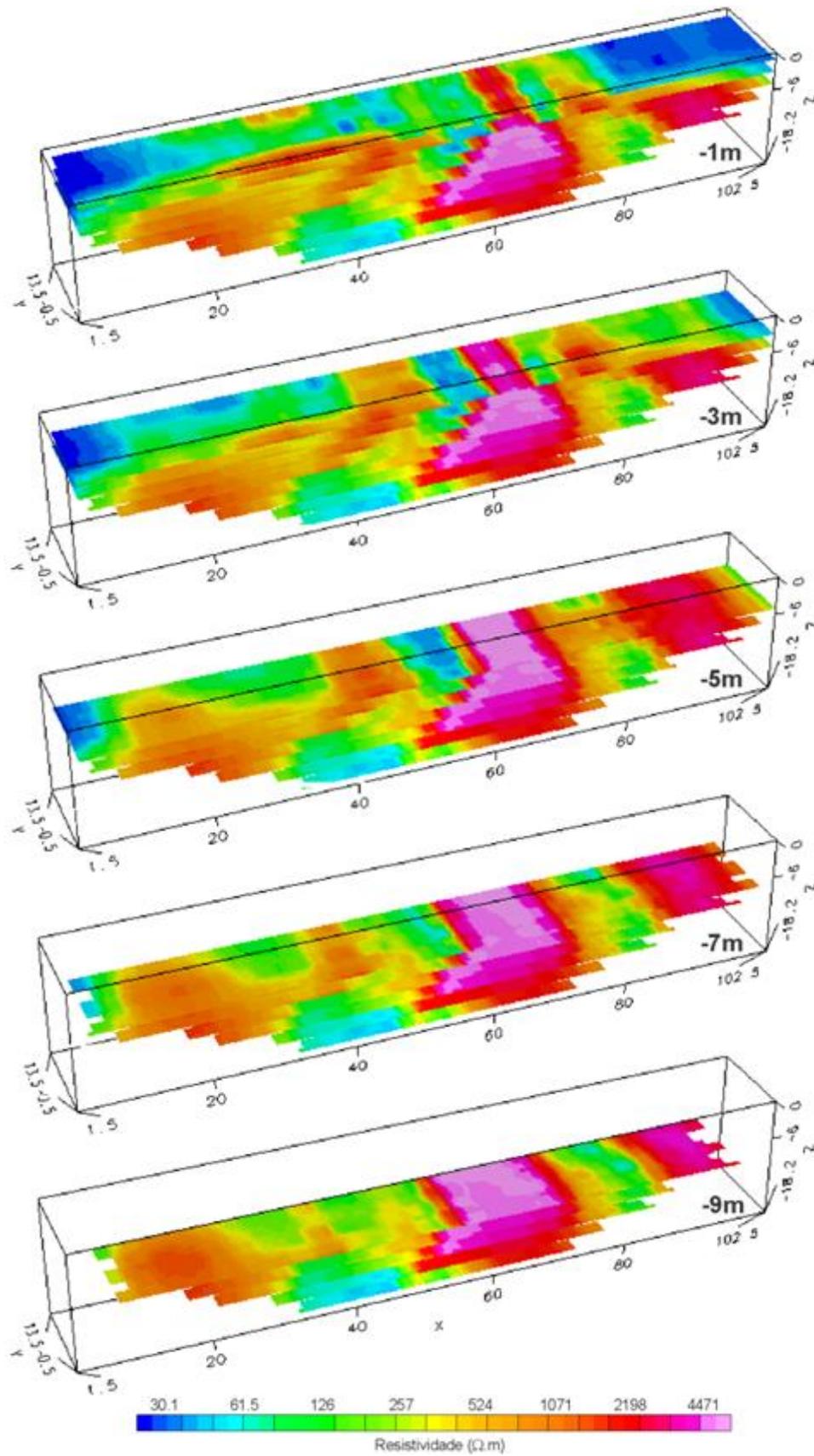
**Figura 25:** Blocos 3D a partir das linhas de aquisição de dados geofísicos. Pseudosseção (acima) e Modelo de Inversão (abaixo)

É possível fazer a análise comparativa entre os blocos, onde a pseudosseção não consegue definir com exatidão a principal zona de baixa de resistividade que representa uma eventual zona percolação de água, como já mencionado nos modelos bidimensionais. Ocorre à esquerda do bloco na profundidade entre 2,5 e 5 metros, que é facilmente perceptível no modelo de inversão apresentando tons azuis.

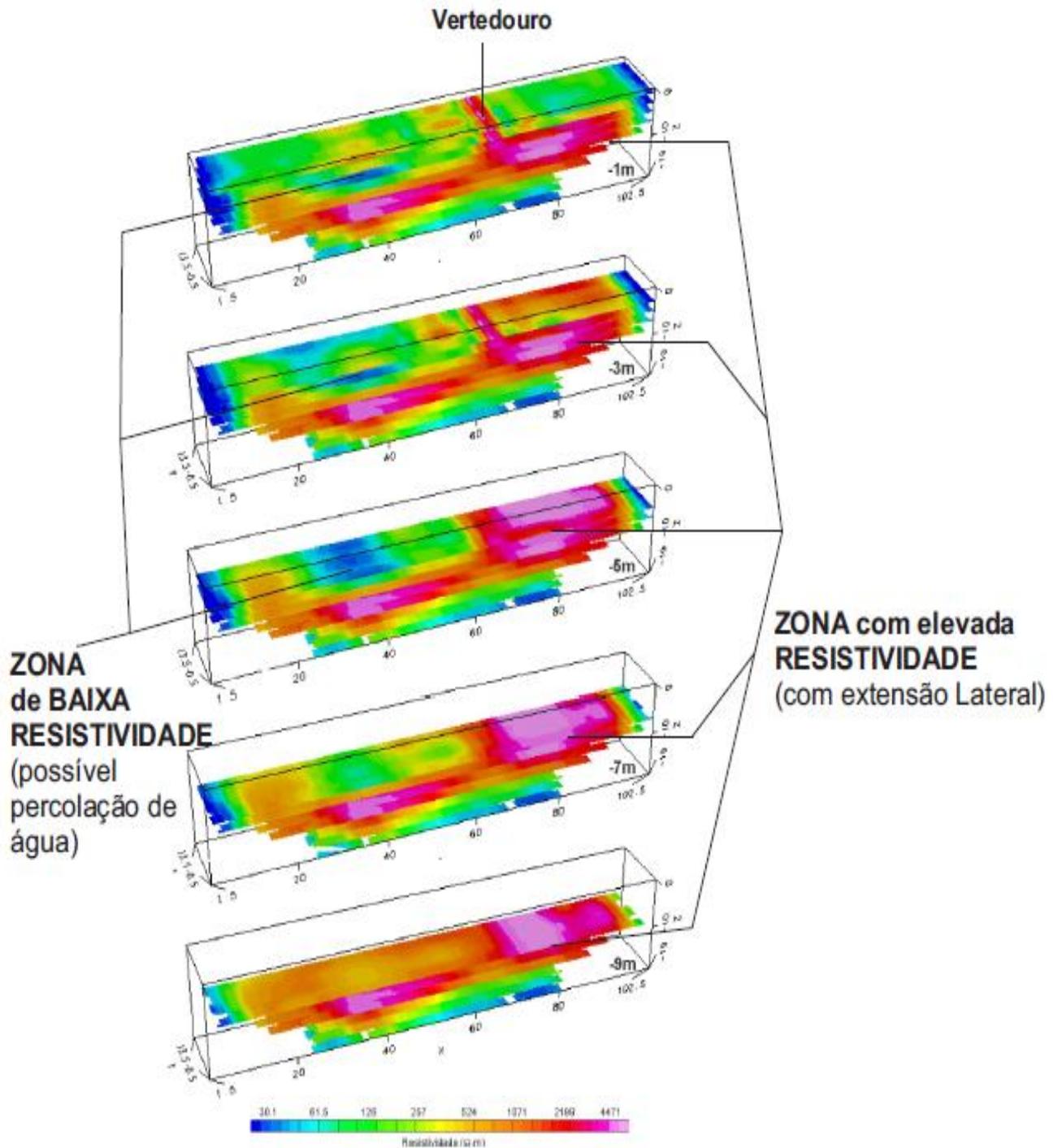
A figura 26 apresenta pseudosseções a partir de cortes realizados em distintas profundidades. Esses cortes permitem analisar minuciosamente locais de baixa e alta resistividade em cada profundidade. A imagem ressalta valores altamente resistivos apenas, e enquanto que a figura 27, representa os modelos de inversão destes cortes em profundidades estabelecidas, ou seja, um produto refinado obtido da pseudosseção, apresenta melhores definições das resistividades do maciço de terra da barragem.

Os cortes subsuperficiais tomados como base na pseudosseção 3D, foram estabelecidos nas profundidades indicadas na figura como -1m,-3m,-5m,-7m e -9m. Já nos modelos de inversão as profundidades do corte são -1m,-3m,-4m,-7m,-9m.

É possível analisar que as zonas de baixa resistividade começam a ter maior representatividade a partir dos 3m de profundidade, como visto no modelo de inversão da figura 27 (não averiguado na pseudosseção). Esta zona de baixa resistividade é restrita e aparece até aproximadamente em 5 metros de profundidade, perdendo sua representatividade em profundidades maiores, como é possível analisar na figura (-7m e -9m).



**Figura 26:** Blocos 3D com pseudoseções a partir de cortes estabelecidos em diferentes profundidades



**Figura 27:** Blocos 3D com modelos de inversão a partir de cortes estabelecidos em diferentes profundidades.

Esta zona de baixa resistividade é encontrada sobre uma zona lateral e contínua de elevada resistividade vista a partir de 6 metros de profundidade. Essa zona é marcante tanto na pseudosseção, quanto no modelo de inversão. É uma zona de alto contraste que representa uma camada contínua que pode ser interpretada como uma mistura envolvendo rocha e argila, utilizada para estabilidade da barragem, criando assim um peso que evita uma provável rotação por instabilidade.

É possível a visualização em ambas as figuras da posição do vertedouro, representado por uma restrita zona de alta resistividade. É definida com mais detalhe no modelo de inversão para 1 e 3 metros de profundidade aproximadamente em 65m de extensão lateral.

Com as figuras das pseudosseções, e principalmente com os cortes em profundidade dos modelos de inversão é possível afirmar que não há locais com baixa resistividade com continuidade vertical, ou seja, não há fluxo vertical de água nas zonas restritas de baixa resistividade.

## 8 CONCLUSÕES

Os produtos geofísicos permitiram concluir que o método geofísico da eletrorresistividade foi eficaz na detecção de áreas com potencial de percolação de água no maciço de terra da barragem de terra estudada.

O maciço é constituído de diversos materiais como solo e rocha, mas essencialmente solos alterados de diabásios provenientes da Formação Serra Geral. Os resultados permitiram uma clara distinção entre zonas de alta e baixa resistividade. Devido ao carácter de condutor elétrico que o aumento da umidade imprime aos materiais geológicos, as zonas de baixa resistividade podem ser interpretadas como áreas de elevada umidade, e conseqüente percolação de água.

Os resultados foram apresentados sob a forma de pseudosseções e os modelos de inversão. As pseudosseções são um resultado direto ou bruto da aquisição tomográfica, enquanto que os modelos de inversão são resultados de processamento suavizados em programa baseado em algoritmos de suavização ou realce dos valores extremos.

Os modelos de inversão deste trabalho definiram zonas principais eletrorresistivas. Interpretadas como zona de percolação de água, vertedouro e um enrocamento.

As pseudosseções forneceram resultados satisfatórios nos valores altamente resistivos. Porém, a identificação de áreas de baixa resistividade ficou bastante prejudicada devido ao pequeno contraste de valores. Neste sentido, as pseudosseções não realçaram valores de baixa resistividade, dificultando assim, a identificação dessas zonas nas figuras e conseqüente certa limitação em tomadas de decisão em campo, para o caso de equipamentos de aquisição tomográfica que permitam a visualização deste tipo de dado imediatamente após a fase de aquisição, como no caso do presente trabalho.

A partir dos modelos de inversão, foi possível a clara definição de zonas de baixa resistividade, aonde existe um potencial para percolação de água, caracterizado por uma zona restrita entre 2,5 e 5 metros de profundidade. Esta zona apresenta continuidade transversal à barragem, ou seja, de montante para jusante, baseado na análise dos modelos 3D.

A existência de horizontes de alta resistividade desde a superfície até 2,5 metros é um indicador da inexistência de fonte superficial de água. Desta forma é provável que a percolação da água do barramento em sentido horizontal seja responsável pelas zonas de baixa resistividade.

Em campo, diante da dificuldade de acesso a frente do barramento, devido à espessa cobertura vegetal, não foi possível a verificação *in loco* de eventuais surgências provenientes de infiltração no corpo do barramento.

As zonas de alta resistividade presentes nas porções mais profundas dos modelos devem refletir a presença de blocos de diabásio utilizados para estabilidade da base do barramento. Essa zona tem importância fundamental, pois caso houver uma percolação de água com evolução para um *piping*, esta seria uma zona com potencial para o princípio desta erosão interna.

O arranjo utilizado e a visualização 3D permitiram uma análise satisfatória dos dados, e a seleção de uma área com potencial infiltração de água, para qual são recomendados investigações diretas comprobatórias e também a realização de outros métodos geofísicos que identifiquem a zona resistiva em profundidade, como por exemplo, uma sísmica de refração.

Neste sentido, o método geofísico da eletrorresistividade demonstra por meio deste trabalho a possibilidade de aplicação desta ferramenta em trabalhos de monitoramento em barragens de terra, com ênfase na detecção de cavidades ou zonas de percolação de água.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEM. **Manual de Instrucción: Terrameter LS. 2011.** Sundbyberg, Suécia: ABEM Instrument AB, 2011. 120p. Disponível em: <<http://www.abem.se/support/downloads/user-manuals/guia-de-usuario-terrameter-ls-20120628>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

AB'SABER, A. N. **Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo.** 1957. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFLCH), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1957.

AIRES ROCHA, C. C.; NEVES, L. L.; PERSECHINI, M. I. M. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.**

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

ASSINE, M. L., PERINOTTO, J. A., ZACHARIAS, A. A. Paleocorrentes, Paleogeografia e Sequências Depositionais na Formação Tatuí, Centro-Leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33 (1), n. , p.1-10, 2003

BARBOSA; GOMES, F. A. Pesquisa de petróleo na bacia do rio Corumbataí Estado de São Paulo. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia do DNPM**, Rio de Janeiro, 71 : 1-40, 1958.

BRAGA, A. C. O. Módulo: Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas. **Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista, 2007.**

BORGES, W.R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP.** Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, São Paulo, SP. 256 p., 2007.

CARVALHO, D. **BARRAGENS: Uma Introdução Para Graduandos**. Campinas: FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2011. Apostila. Disponível em: <[www.feagri.unicamp.br](http://www.feagri.unicamp.br)>. Acesso em: 9 jun. 2014.

CERRI, L. E. da S.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. do C. Diretrizes para a elaboração de plano de operação de barragens de terra de pequenas dimensões. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais...**. Rio Claro: Unesp, 2011. p. 1 - 18. Disponível em: <[www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

CPRM- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo: Sistemas de Informações Geográficas (SIG)**. Brasília: MME, Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais, 2006. Escala 1:750000, CD-ROM.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Guia prático para o projeto de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo: DAEE, 2006. 2 ed. 116p.

DEGROOT-HEDLIN, C; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, v. 55, n. 12, p. 1613-1624, 1990.

DOBERSTEIN, A. W. **O EGITO ANTIGO (recurso eletrônico)**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2010. 174 p. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/orgaos/edipucrs/>>. Acesso em: 30 set. 2014.

EDWARDS, L. S. A modified pseudosection for resistivity and IP. **Geophysics**, v. 42, n. 5, p. 1020-1036, 1977.

FELL, Robin; MACGREGOR, Patrick; STAPLEDON, David. **Geotechnical engineering of embankment dams**. Balkema, 1992.

GANDOLFO, O. C. B. **UM ESTUDO DO IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO NA INVESTIGAÇÃO RASA**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Departamento de Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7: Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner (a,b,g), dipole-dipole, inline pole-pole, poledipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays On land, water and cross-borehole surveys**. 2010. Disponível em: <<http://www.geotomosoft.com/downloads.php>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

KANJI, M. A. **PARECER TÉCNICO SOBRE RUPTURA BARRAGEM CAMARÁ – MIN. PÚBLICO PARAÍBA**. São Paulo, 2004. Disponível em: <[www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC029/MKANJICamara.pdf](http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC029/MKANJICamara.pdf)> Acesso em: 30 set. 2014.

KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. 1966. 562 p.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H-J. **Environmental geology: Handbook of field methods and case studies**. Springer, 2007. 1357 p.

LEWIS, Barry. **Small Dams: Planning, Construction and Maintenance**. Melbourne, Australia: CRC Press: Taylor & Francis Grou, 2014. 191 p.

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. **Geophysical prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131-152, 1996.

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2007. 381 p.

MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A.C.O; ELIS,V.R.; DOURADO, J. C. Estudos de minibarragens: Exemplo de aplicação de técnicas geofísicas. **Geociências**, Rio Claro, v. 18, nº1, p 53-67, 1999.

MARQUES FILHO, P. L; GERALDO, A.. Barragens e Reservatórios. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 24. p. 397-418.

MATTOS, N. H. S. **CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E POTENCIAL PETROLÍFERO DO GRUPO ITARARÉ, NA REGIÃO CENTRO-LESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO.** 2012. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Departamento de Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, 2012.

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

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

MIRANDA, M J. de et al. (Org.). **Clima dos Municípios Paulistas.** Campinas. 2014. CEPAGRI/Unicamp. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br> >. Acesso em: 30 set. 2014.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking Into the Earth: An introduction to geological geophysics.** Nova York: Cambridge University Press, 2000. 470 p.

PASTORE, E. L; FONTES, R. M.. Caracterização e Classificação de Solos. In: OLIVEIRA, A.M.S; BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 12. p. 197-210.

PONÇANO, W. L. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada, 1981.

PRICE, David George; FREITAS, Michael H. de (Ed.). **Engineering Geology: Principles and Practice.** London: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2009. 450 p.

REBOUÇAS, A.C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978 . **Anais...**, v.6, Recife: SBG. p. 2963-1976.

ROSA FILHO, E. F. da; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E; BITTENCOURT, A. V. L. A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL PARA A CULTURA DA

SOJA NO ESTADO DO PARANÁ. **Águas Subterrâneas**, Curitiba, v. 20, n. 2, p.49-56, 2006.

SHERIFF, R. E. **Geophysical methods**. New Jersey New Jersey: Prentice Hall, 1989.

SOARES, P. C; LANDIM, P.M.B. Divisão estratigráfica do Mesozóico no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, n. 4, p. 229-251, 1975.

TANCHEV, L. **Dams and Appurtenant Hydraulic Structures**. 2. ed. London, Uk: CRC Press Taylor & Francis Gro, 2014. 1073 p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. Second Edition. Cambridge University Press, 1990..

TORRES, M. **ROCHAS BASÁLTICAS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL NO MUNICÍPIO DE ARAÇATUBA, ESTADO DE SÃO PAULO**. 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2005.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. **Bacia do Paraná**. In: Origem e Evolução de bacias sedimentares. RAJA GABAGLIA, G. P., MILANI, E. J. (eds.) Rio de Janeiro: PETROBRAS/SEREC/CEN-SUD, 1991. p. 135-168.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. et al. **ESTUDOS PRELIMINARES PARA A INTEGRAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE E SEGURANÇA DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS COM A REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO**. 2005. Disponível em: < <https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/geodesia/Artigos/G018.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2014.