

**APLICAÇÃO INTEGRADA DE MÉTODOS MULTIFÍSICOS NO
MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO**

Lucca Martins Franco

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador: Dr. Emanuele Francesco La Terra

Coorientador: Dr. Sergio Luiz Fontes

Rio de Janeiro

Agosto de 2021

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo apoio e amor incondicionais.

Agradeço ao Professor Emanuele pela orientação e sabedoria transmitida.

Agradeço aos colegas Alcides, Israeli, Jonne, José Antonio e Raisal. Sem vocês a realização deste trabalho seria impossível.

Agradeço aos meus amigos pela parceria e bons momentos.

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

*“Rock with a purpose
Got a mind that won’t bend
Die hard resolution
That is true to the end”*

(Judas Priest)

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

APLICAÇÃO INTEGRADA DE MÉTODOS MULTIFÍSICOS NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO

Lucca Martins Franco

Agosto / 2021

Este trabalho objetiva a adequação de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos para a finalidade de monitoramento de barragens de terra para contenção. O trabalho tem como justificativa o elevado número de incidentes envolvendo o rompimento de barragens de terra e enrocamento na última década. Propomos a utilização conjunta dos métodos de tomografia de resistividade elétrica (ERT), polarização induzida (IP) e radar de penetração do solo (GPR) como mecanismos indiretos, não invasivos, para verificação das condições de estabilidade estrutural e hidráulica dos taludes e fundação de barragens. Esta abordagem constitui uma sistemática de trabalho complementar a instrumentação tradicional, de auscultação, a qual envolve a utilização de piezômetros, medidores de nível e de deslocamento, além de inspeções visuais. A área teste, na qual o levantamento geofísico foi realizado, é uma barragem de terra localizada no estado do Rio de Janeiro (RJ), cujo reservatório é voltado a contenção de água para fins industriais. Conforme discutido à frente, o processamento de dados e interpretações mostraram-se eficientes para a finalidade proposta e, portanto, a metodologia poderá ser aplicada em barragens de terra para qualquer tipo de reservatório, sendo de maior interesse, barragens de contenção de rejeitos de minério.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

INTEGRATED APPLICATION OF MULTIPHYSICAL METHODS IN MONITORING CONTAINMENT DAMS

Lucca Martins Franco

August / 2021

The project aims the adaptation of electrical and electromagnetic geophysical methods for the purpose of monitoring containment landfill dams. This work is justified by the high number of incidents involving the breaking of tailing and rockfill dams in the last decade. We propose the combined use of the electric resistivity tomography (ERT), induced polarization (IP) and ground penetrating radar (GPR) methods as indirect, non-invasive, mechanisms to verify the structural and hydrodynamic stability conditions of the dike and dam foundation. This approach is complementar to the traditional instrumentation, which involves the use of piezometers, level and displacement measurers, as well as visual inspections. The test area, in which the geophysical survey was carried out, is located in the Rio de Janeiro state (RJ), Brazil. The reservoir in this case is intended for water containment for industrial purposes. As discussed ahead, the data processing and interpretations proved to be efficient for the proposed purpose and, therefore, the methodology can be applied to earth dams for any type of reservoir, being of greater interest, ore tailing dams.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	14
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Motivação.....	16
2. BARRAGENS DE CONTENÇÃO – REVISÃO TÉCNICA.....	19
2.1 Tipos de Barragem	20
2.1.1 BARRAGENS DE CONCRETO-GRAVIDADE.....	20
2.1.2 BARRAGENS DE GRAVIDADE-ALIVIADA E CONTRAFORTES.....	21
2.1.3 BARRAGENS EM ARCO	22
2.2 Barragens de Aterro	23
2.2.1 BARRAGENS DE ENROCAMENTO	24
2.2.2 BARRAGENS DE TERRA	26
3. METODOLOGIA.....	39
3.1 Métodos Elétricos	39
3.1.1 CONCEITOS BÁSICOS	39
3.1.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS GEOLÓGICOS.....	41
3.2 Tomografia de Resistividade Elétrica - Eletrorresistividade.....	45
3.2.1 FLUXO DE CORRENTE EM SUBSUPERFÍCIE	47
3.2.2 ARRANJO DOS ELETRODOS	49
3.2.3 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ERT	52
3.3 Polarização Induzida.....	54
3.3.1 AQUISIÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA	55
3.3.2 MECANISMOS DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA	58
3.4 Ground Penetrating Radar (GPR)	60
3.4.1 INTRODUÇÃO	60
3.4.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS	64
3.4.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS	66
4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E GEOLÓGICAS DO SÍTIO DA BARRAGEM	69
4.1 Descrição Geotécnica da Barragem	69
4.1.1 ANÁLISE PIEZOMÉTRICA E PLUVIOMÉTRICA.....	75
4.2 Aspectos Geológicos Regionais	81
4.2.1 FAIXA RIBEIRA.....	82
4.2.2 COMPLEXO RIO NEGRO.....	82

4.3 Caracterização da Geologia no Local do Sítio da Barragem.....	83
5. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS	85
5.1 Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT).....	85
5.2 Polarização Induzida (IP)	90
5.3 Ground Penetrating Radar (GPR)	92
5.4 Global Navigation Satellite System (GNSS)	94
6. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	97
6.1 Tomografia de Resistividade Elétrica	97
6.2 Polarização Induzida.....	101
6.3 GPR.....	104
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
7.1 Análise da Seção L1 (Crista).....	111
7.2 Análise da Seção L2	114
7.3 Análise da Seção L3	116
7.4 Análise da Seção L4	118
7.5 Análise da Seção L5	120
7.6 Análise da Seção L6	123
7.7 Análise da Seção L7 (Transversal)	125
7.8 Análise dos radagramas de GPR.....	130
7.9 Qualidade dos Dados	133
8. CONCLUSÕES.....	136
Referências Bibliográficas.....	138
ANEXO I.....	147
ANEXO II.....	150
ANEXO III.....	153
ANEXO IV.....	156
ANEXO V.....	159
ANEXO VI.....	162

Lista de Figuras

- Figura 1.1.** Principais barragens no estado do Rio de Janeiro, classificadas de acordo com o material de sustentação, segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (A) e o Instituto Estadual do Ambiente – INEA (B)..... 18
- Figura 2.1.** Barragem de Willow Creek, em Óregon (Estados Unidos), um exemplo de estrutura do tipo concreto-gravidade com alta estabilidade (de US Army Corps of Engineers, 2009).....20
- Figura 2.2.** Barragem de Glen Canyon, no curso do rio Colorado, Arizona (Estados Unidos), um exemplo de estrutura em arco. Na figura, é possível observar o estreitamento do talvegue, muito profundo e inciso, além da estrutura de concreto engastada nas ombreiras, diretamente sobre o arenito da Formação Navajo, no vale do rio Colorado (de Vicente Villàmon, Flickr, 2009).....23
- Figura 2.3.** Esquema ilustrativo de barragens de enrocamento com núcleo de argila, ou Earth Core Rock Dams (ECRDs). Em (a) o núcleo argiloso é centrado paralelamente ao eixo da barragem. Em (b) o núcleo apresenta inclinação em direção à montante (Modificado de Massad, 2003).....25
- Figura 2.4.** Barragem de Bakun, no curso do rio Balui, Malásia. A estrutura é um exemplo de barragem de enrocamento com face de concreto, ou Concrete Face Rock Dam (CFRD). Na foto, é possível observar a face de concreto voltada a montante e o enrocamento no talude de jusante (de Gordan & Adnan, 2017).....26
- Figura 2.5.** Barragem Casa de Pedra, de propriedade e uso da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Congonhas (MG), um exemplo de barragem de terra com alteamento a montante. Este tipo de estrutura é muito comum no Brasil devido à grande disponibilidade de material terroso e custo de instalação reduzido (de Rodrigues, 2019).....28
- Figura 2.6.** Esquema ilustrativo das barragens de terra (A) homogênea e (B) zonada, além dos elementos básicos constituintes de cada uma delas. É possível observar o abatimento dos taludes através da razão de 2,5 H:1V. Estruturas associadas ao controle da fundação estão presentes em ambas (Modificado de Marcos Filho et al., 1998).....29
- Figura 2.7.** Três tipos existentes de piping descritos na literatura. Em (A) é caracterizada a erosão interna regressiva, com formação de conduto. Em (B) é ilustrado o piping associado a concentração de fluxo e alargamento de fissuras pré-existentes no maciço. Em (C) é ilustrado o processo de formação de piping por carreamento de finos (Modificado de Perini, 2009).....31
- Figura 2.8.** Método de alteamento utilizado nas barragens de rejeito mineral. A primeira figura ilustra o alteamento a montante, método mais comum no Brasil, no qual os aterros hidráulicos são alteados em direção à praia de rejeitos. A segunda figura ilustra o alteamento a jusante, que envolve maior controle construtivo, porém com custos superiores. A última ilustração, mostra o método de linha de centro, no qual os eixos dos alteamentos e do maciço de barragem coincidem.....36
- Figura 3.1.** Cilindro condutor isotrópico, hipotético, com seção reta uniforme. Estão indicados os parâmetros de resistência elétrica (R), área da seção transversal (A) e comprimento (L), os quais são utilizados no cálculo da resistividade (Kearey et al., 2002).....41
- Figura 3.2.** Variação da resistividade para os principais materiais geológicos presentes na crosta, os quais estão agrupados em condutores, semicondutores e isolantes (Kearey et al., 2002).....45
- Figura 3.3.** Arranjo simples, hipotético, de tomografia de resistividade elétrica (ERT), com quatro eletrodos, um par de corrente (A, B) e outro de potencial (M, N). No caso, a polaridade oposta entre os eletrodos A (positivo) e B (negativo), possibilita o cálculo da diferença de potencial elétrico (ΔV) existente entre os eletrodos M e N (Case, 2012).....46

Figura 3.4. Eletrodos de corrente (A, B) e potencial (M, N), em superfície (figura superior) e o campo elétrico gerado em subsuperfície (figura inferior), com a disposição das linhas de fluxo de corrente (Dentith & Mudge, 2014).....	48
Figura 3.5. Arranjos de ERT, (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) Dipolo-Dipolo (Modificado de Case, 2012).....	50
Figura 3.6. Pseudoseções de resistividade aparente exibindo um corpo resistor em um meio homogêneo, nas configurações de eletrodos (a) Dipolo-dipolo e; (b) Wenner (Samouelian et al., 2005).....	52
Figura 3.7. Curva de resistividade aparente para um meio heterogêneo de duas camadas horizontais, sendo a superior mais resistiva (Kearey et al., 2002).....	54
Figura 3.8. Curva de relaxação ou transiente hipotética em aquisição IP, domínio do tempo. É possível observar um rápido decréscimo de voltagem no tempo t_0 , quando interrompida a corrente. A partir de então, o decaimento de potencial é gradual até que se torne nulo. A cargabilidade é representada pela área (A) contida no intervalo de tempo t_1-t_2 . A diferença de potencial resultante (ΔVC), entre a interrupção da corrente e o momento da descarga, no tempo t_3 , é utilizada como constante de normalização no cálculo da cargabilidade (Kearey et al., 2002).....	56
Figura 3.9. Modelo ilustrativo do fenômeno de polarização de membrana. As cargas positivas tendem a aderir no contato entre o fluido e a matriz, devido à concentração de ânions nas fases minerais. Após estabelecida uma diferença de potencial, ocorre polarização do material nas zonas de constrição, onde ocorre estreitamento dos poros (Kearey et al., 2002).....	59
Figura 3.10. Modelo ilustrativo do fenômeno de polarização de eletrodo, no qual a condução é eletrônica e ocorre através de um grão mineral condutor, obstruindo uma zona de constrição de poro. Quando estabelecida uma diferença de potencial, as cargas de sinal oposto concentram-se em cada lado do grão, gerando a polarização induzida (Kearey et al., 2002).....	60
Figura 3.11. Exemplo esquemático da lei de Snell, ilustrando dois meios com propriedades eletromagnéticas distintas. No caso, ocorre modificação na velocidade da onda ao transitar na região de interface entre ambos (Annan, 2001).....	62
Figura 3.12. Diagrama ilustrando o comportamento de um pulso EM na região de interface entre meios com velocidades diferentes. No caso, a reflexão ocorre com ângulo igual ao de incidência e a refração segundo o ângulo crítico. Nesta, os raios se propagam paralelamente a superfície (Baker et al., 2007).....	63
Figura 3.13. Diagrama esquemático da técnica de CMP, na qual o espaçamento (S) entre a antena transmissora (T) e receptora (R) é gradualmente estendido, em torno de um ponto médio fixo (Jol, 2009).....	66
Figura 3.14. Diagrama esquemático da técnica de CO, na qual o espaçamento entre as antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx) é mantido constante, assim como o intervalo de amostragem e a orientação das antenas (Baker et al., 2007).....	67
Figura 3.15. Diagrama esquemático da técnica de Transluminância, na qual as antenas são inseridas em furos de sondagem e então deslocadas em incrementos regulares, o que resulta no mapeamento do meio em seções verticais (Baker et al., 2007).....	68
Figura 4.1. Planta da barragem de interesse, apresentando o posicionamento dos piezômetros (em amarelo) e medidores de nível d'água (em vermelho), além dos principais elementos constituintes da estrutura, tais quais, maciço central, ombreiras e reservatório.....	70
Figura 4.2. (A) Seção esquemática simples de direção N185, transversal ao coroamento da barragem e corte ajustado a posição média do maciço (posição central da estrutura). Nesta, são representados os parâmetros de montante (submerso) e jusante, além de algumas estruturas internas e de fundação fundamentais; (B) Planta simplificada representando a região do aterro	

compactado e cercanias, com destaque a alguns elementos de fundação (cortina de injeções, diafragma e trincheiras drenantes), além de cortes de ombreira e curvas de nível.....71

Figura 4.3. (a) Vista do topo da barragem com face para a represa; (b) parâmetro de jusante, dispondo de uma série de piezômetros e medidores de nível posicionados sobre os patamares do dique frontal; (c) barragem vista de sua base. O duto situado abaixo da estrutura permite a drenagem e eliminação de água e sólidos, em caso de saturação dos filtros; (d) vertedouro da represa. A estrutura de concreto está situada a norte da barragem de terra e permite a descarga do excesso de água, em períodos de intensa precipitação, a jusante do rio.....72

Figura 4.4. (A) e (B) Berma projetada para tomada d'água no vertedouro de concreto. Em períodos de baixa precipitação, a região de contato entre o concreto e o solo aluvionar permanece exposta e está sujeita a deterioração; (C) e (D) soleira de concreto para adução d'água, sobre a qual estão posicionadas sequências de dentes de concreto e calhas laterais para desobstrução do canal.....73

Figura 4.5. Níveis piezométricos em seção perpendicular à crista, em sua porção meridional, com respeito a sete piezômetros, nos meses de outubro/2019 e março/2020. Os traços de cor azul e vermelha remetem, respectivamente, ao mês de outubro/2019 e março/2020. A direção do fluxo d'água está indicada à montante do maciço de barragem.....75

Figura 4.6. Índice pluviométrico na área de estudo, com valores de precipitação em milímetros, para o período compreendido entre março de 2019 e 2020.....76

Figura 4.7. Alturas piezométricas no segmento central do maciço de barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.....77

Figura 4.8. Alturas piezométricas ao longo de segmento da ombreira direita da barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.....78

Figura 4.9. Alturas piezométricas ao longo de segmento da ombreira esquerda da barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.....79

Figura 4.10. (esquerda) Atitude da foliação gnáissica-migmatítica média (Sn) nas imediações da ombreira esquerda, plotada junto aos polos e vetor médio destes; (direita) Foliação gnáissica-migmatítica média (Sn) nas imediações da ombreira direita, plotada junto aos polos e vetor médio. A intersecção dos planos de foliação, próxima ao eixo axial, sugere a ocorrência de uma dobra. O plano em vermelho remete ao dique lamprófiro, que intersecta as rochas da fundação.....83

Figura 5.1. Mapa da barragem, ilustrando a posição das linhas de ERT/IP.....86

Figura 5.2. (A) Disposição dos eletrodos polarizáveis de aço, conectados entre si através de cabos multi-condutores, sobre a crista da barragem, durante aquisição ERT; (B) Estação de aquisição do método ERT na linha de eletrodos L3, paralela a crista da barragem. O sistema consiste no módulo resistímetro do SuperSting, o switch box, duas baterias de alimentação de 12 volts e cabos multi-condutores, os quais estão conectados aos eletrodos polarizáveis; (C) Módulo do SuperSting R8/IP, da marca AGI, utilizado no levantamento; (D) Eletrodo polarizável de aço inox conectado a um cabo multi-condutor, durante aquisição na crista da barragem.....87

Figura 5.3. (a) Eletrodo polarizável e não-polarizável colocados sobre o solo durante aquisição do tipo IP, (b) Supersting R8/IP conectado a switch box durante aquisição IP na Linha 2.....90

Figura 5.4. Mapa da barragem, ilustrando a posição das linhas de GPR.....91

Figura 5.5. GPR ProEx System, da marca Mala, utilizado na primeira campanha de aquisições geofísicas. O suporte de madeira serve para espaçar as antenas no método common offset. O monitor digital é transportado em uma unidade portátil, junto a bateria externa.....93

Figura 5.6. (a) Estação base GNSS instalada em posição central na crista da barragem, (b) Controle digital portátil TSC2, ferramenta útil no controle e armazenamento de dados de satélite coletados por meio das estações móveis.....	94
Figura 5.7. Mapa da barragem, ilustrando os pontos coletados com o GNSS Trimble R8s RTK. O ponto em amarelo representa a posição da estação base, enquanto os pontos em vermelho remetem as estações móveis (rover), distribuídas ao longo do maciço e sobre as ombreiras.....	95
Figura 6.1. Gráfico de dispersão dos dados de resistividade aparente em superfície. As cores quentes representam eletrodos de corrente e as frias eletrodos de potencial. Também é possível observar o efeito em profundidade resultante do ruído gerado pelos eletrodos.....	96
Figura 6.2. (de cima para baixo) Pseudoseção de resistividade aparente medida; Pseudoseção de resistividade aparente calculada; Seção de resistividade invertida.....	99
Figura 6.3. Seção de resistividade invertida (topo) e seção de IP invertida (base), da Linha 4, em aquisição do tipo IP Dipolo-Dipolo, realizada em outubro de 2019.....	102
Figura 6.4. Fluxograma com as fases de aquisição, processamento, apresentação e visualização dos dados de GPR. As etapas de processamento estão destacadas no canto inferior direito (Jol, 2009).....	104
Figura 6.5. Técnicas de visualização de dados de GPR (A) Pseudoseção 2D relacionando a profundidade com a distância horizontal. No caso a interpretação foi feita com o auxílio da descrição de testemunhos de sondagem; (B) Seções horizontais ou time slices geradas a partir da interpolação de perfis de GPR; (C) bloco 3D gerado, também, pela interpolação de seções 2D (Dentith & Mudge, 2014; HunterGeophysics.com; Gabrys et al., 2019).....	107
Figura 6.6. Interface do software RadExplorer, da MALA Geoscience, mostrando a função bandpass filtering em dados de GPR.....	108
Figura 7.1. Mapa da barragem, exibindo seus principais compartimentos (ombreiras, maciço e reservatório), além do posicionamento das linhas de ERT e IP, em amarelo.....	110
Figura 7.2. (A) Seção ERT da crista, exibindo possível zona de fratura (descontinuidade); (B) Seção de cargabilidade da crista da barragem. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.....	111
Figura 7.3. Time-lapse da seção 1 (crista), exibindo pouca variação percentual em valores de resistividade entre os meses de outubro/2019 e março/2020.....	112
Figura 7.4. (A) Seção ERT da linha 2, exibindo o aterro de barragem e parte da ombreira esquerda do maciço; (B) Seção de cargabilidade da linha 2, mostrando provável região de saturação em água, na porção central do dique. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.....	114
Figura 7.5. Time-lapse da seção 2, exibindo pouca variação percentual em valores de resistividade entre os meses de outubro/2019 e março/2020.....	115
Figura 7.6. (A) Seção ERT da linha 3, dispondo o solo (em cor azul) condutivo, empregado na consolidação do maciço. A feição resistiva, indicada pela seta, poderia corresponder a um diafragma plástico, uma solução de engenharia comum em barragens de terra; (B) Seção de cargabilidade na linha L3. Valores mais elevados de tal parâmetro no local que, supostamente, corresponde ao diafragma, destacam a estanqueidade da estrutura nesta porção. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.....	116
Figura 7.7. Seção time-lapse da linha L3, exibindo alta de condutividade nas regiões indicadas e, principalmente, nas ombreiras.....	117

- Figura 7.8.** (A) Seção ERT da linha L4, ilustrando significativa diferença de resistividade entre ombreiras e aterro; (B) Seção de cargabilidade na Linha L4, dispo de valores elevados de condutividade no centro do aterro, o que sugere saturação do solo. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções..... 119
- Figura 7.9.** Seção time-lapse correspondente à linha 4, exibindo pouca variação percentual de resistividade ao longo do maciço e ombreiras..... 119
- Figura 7.10.** (A) Seção ERT da linha L5, ilustrando um bloco de elevada resistividade em meio ao aterro central e uma descontinuidade, coincidente com o piezômetro PZ-46, na ombreira esquerda; (B) Seção de cargabilidade na Linha L5, exibindo a tubulação de descarga da barragem, além da descontinuidade na ombreira esquerda. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções..... 120
- Figura 7.11.** Seção time-lapse correspondente a linha 5, a qual não revelou variações percentuais consideráveis de resistividade..... 121
- Figura 7.12.** (A) Seção de resistividade da linha L6, exibindo o duto central de descarga de cheias, além de feições circulares que se assemelham a erosões preenchidas por material aquoso, mas que podem, também, corresponder a drenos; (B) Seção de cargabilidade da linha L6, exibindo os dutos de captação de água e de descarga de cheias. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções..... 123
- Figura 7.13.** Seção time-lapse relativa à linha L6. Não foram identificadas feições de aumento percentual de condutividade, o que mostra boa estanqueidade da estrutura no decorrer dos meses. Ao contrário, a seção mostra-se mais resistiva, em especial, na fundação da barragem, conforme mostra a anomalia central de cor amarela e vermelha..... 124
- Figura 7.14.** (A) Seção de resistividade da linha L7 (transversal). É possível identificar a pluma de material condutivo de propagando a partir da crista e rebaixando em direção à jusante. Também está delimitada a estrutura relativa à ensecadeira da barragem; (B) Seção de cargabilidade da linha L7. As regiões saturadas ocorrem abaixo do nível piezométrico e estão destacadas nas cores azul e verde. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções..... 126
- Figura 7.15.** Seção de time-lapse relativa à linha L7 (transversal). É possível identificar feições de aumento percentual de resistividade, relacionadas ao enrocamento no pé do talude e à ensecadeira, sobre a fundação da barragem..... 127
- Figura 7.16.** Bloco 3D de resistividade elétrica, obtido no software EarthImager 3D, a partir da interpolação de seis seções 2D paralelas, com relação ao mês de outubro/2019, primeira aquisição..... 128
- Figura 7.17.** Bloco 3D de resistividade elétrica, obtido no software EarthImager 3D, a partir da interpolação de seis seções 2D paralelas, com relação ao mês de março/2020..... 128
- Figura 7.18.** Mapa da barragem, exibindo seus principais compartimentos (ombreiras, maciço e reservatório), além do posicionamento das linhas de GPR, em azul..... 129
- Figura 7.19.** Interpretação dos radogramas de GPR, com relação às seções (A) L1; (B) L2; (C) L3; (D) L4; (E) L5; (F) L6..... 130
- Figura 7.20.** Painel esquemático elaborado para comparação e análise de qualidade das feições de resistividade. (esquerda) seções ERT aquisitadas na Etapa 1_B1; (direita) seções ERT aquisitadas na Etapa 1_B2..... 133
- Figura 7.21.** (A) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 1_B1; (B) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 1_B2; (C) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 2..... 134

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Vantagens e desvantagens nos arranjos ERT (Samouelian et al., 2005).....	51
Tabela 4.1. Piezômetros e suas respectivas leituras.....	76
Tabela 5.1. Linhas de ERT.....	86
Tabela 5.2. Linhas de IP.....	91
Tabela 5.3. Linhas de GPR.....	93

1 INTRODUÇÃO

A utilização de métodos geofísicos com finalidade de monitoramento de obras de contenção é uma prática em ascensão que, embora recente, torna-se recorrente em pesquisas relacionadas aos setores de prospecção mineral e engenharia civil. O presente trabalho, contudo, propõe uma abordagem de aquisição de dados e análise que se distingue das demais, por tratar-se de uma aplicação integrada que transita entre os métodos geoeletrico e eletromagnético. No caso, deseja-se explorar as aplicações que decorrem da manipulação de parâmetros físicos em meios geológicos artificiais, mais especificamente aterros de pequeno porte, constituídos por solos argilosos compactados.

O projeto também demonstra de que maneira determinadas propriedades geológicas controlam e modulam os sinais registrados a partir de ensaios geofísicos. Em aterros, destacam-se fatores associados a natureza sedimentar do solo empregado, a exemplo: porosidade, permeabilidade, composição mineralógica, granulometria, grau de seleção dos grãos, anisotropias (fraturas e descontinuidades), presença de argilominerais e de fluidos aquosos.

Aqui propõe-se utilizar os métodos de tomografia de resistividade elétrica (ERT), polarização induzida (IP) e radar de penetração do solo (GPR) em barragens de terra, a fim de se observar o desempenho do solo empregado no aterro e dos instrumentos geotécnicos nele instalados, identificando possíveis zonas de liquefação, fissuras e descontinuidades na estrutura. O projeto tem como objetivo testar a viabilidade da metodologia para a finalidade proposta, buscando determinar arranjos de campo, parametrizações e técnicas de processamento que melhor se adaptem ao estudo de barragens.

São diversos os estudos que, na literatura, se utilizam dos métodos de tomografia de resistividade elétrica (Camarero, 2019, Case, 2012, Di & Wang, 2010, Johansson & Dahlin, 1996, Kemna et al., 2012, Minsley et al., 2014, Panthulu et al., 2001, Shin et al., 2019, Sjodahl et al., 2005, Sjodahl et al., 2008, Teixeira et al., 2013) polarização induzida (Abdulsamad et al., 2019, Ahmed et al., 2020, Matínez-Moreno et al., 2018) e GPR (Anchuela et al., 2018, Xu et al., 2010) no estudo de barragens de contenção.

A área teste, na qual a pesquisa foi desenvolvida, é uma barragem de terra, destinada ao armazenamento de água, que se situa no interior do estado do Rio de Janeiro (RJ). A obra de contenção, no caso, represa águas do curso de um rio de pequeno porte em um reservatório de 6 milhões m³, para fins industriais. Foram realizadas duas campanhas de aquisição de dados, em outubro de 2019 e março de 2020, conforme discutido nos capítulos seguintes. A comparação de informações obtidas em ambas as campanhas teve como objetivo a detecção de alterações temporais significativas no comportamento hidráulico e estrutural do talude e ombreiras da barragem, em decorrência de variações climáticas de pluviometria e vazão fluvial, ao longo de um período de seis meses.

A pesquisa alia conhecimentos de geofísica aplicada, geotecnia, engenharia de barragens, hidrogeologia e geologia. A interpretação das informações levantadas em campo foram, portanto, realizadas de forma complementar aos dados de auscultação (leituras piezométricas, medições de nível freático da barragem e reservatório) e de engenharia (projeto estrutural da barragem), fornecidos pela empresa responsável pelo monitoramento geotécnico e vistoria da barragem.

Um termo de confidencialidade foi firmado entre o Observatório Nacional e os responsáveis pela barragem em questão, no intuito de se preservar o nome da empresa e evitar a divulgação de informações sigilosas. Por este motivo o nome e localização da barragem foram omitidos neste trabalho. Vale afirmar que o projeto objetivou a comprovação da viabilidade de uma metodologia e, para isso, uma área teste foi necessária. Não houve o intuito de se fiscalizar a barragem estudada, buscando identificar se a mesma se encontra em condições adequadas de funcionamento.

1.1 Objetivos

O principal objetivo da pesquisa é desenvolver uma metodologia de investigação de barragens e taludes de terra que não seja invasiva e possibilite acompanhar o desempenho do maciço no decorrer do tempo, permitindo avaliações de risco potencial e fator de segurança mais precisas. A metodologia

compõe uma abordagem complementar às avaliações técnicas tradicionais da geotecnia ou metodologia de auscultação, que recorrem quase sempre a técnicas de sondagem e utilização de sensores de deslocamento, além de inspeções visuais.

Se, por meio do projeto piloto aqui proposto, for comprovada a viabilidade da metodologia, novas técnicas geofísicas (potencial espontâneo e microssísmica) deverão ser implementadas, tornando a análise ainda mais detalhada e confiável. Um objetivo secundário é formar parcerias com empresas que necessitem de uma instrumentação de monitoramento mais sofisticada, o que se torna cada vez mais importante, dado o aumento do número de incidentes catastróficos em barragens de rejeito mineral e mudanças recentes na legislação relativa ao tema.

Embora o principal interesse sejam as barragens de alteamento voltadas à mineração, deseja-se criar um método que seja aplicável em qualquer barragem de aterro e para qualquer finalidade ou tipo de reservatório.

1.2 Motivação

O trabalho tem como motivação a preservação da vida e do ecossistema em regiões em que a ocupação humana e a transformação da paisagem chegaram a um ponto preocupante. Incidentes como os de Algodões (PI), em 2009, Mariana (MG), em 2015, Brumadinho (MG) e Pedro Alexandre (BA), em 2019 sugerem que, talvez, empresas e entidades governamentais responsáveis pela fiscalização de barragens não estejam completamente munidas de técnicas e instrumentação adequadas. Os danos ambientais, materiais e humanos associados a tais catástrofes são quase sempre irreversíveis, sendo o custo de remediação superior ao custo operacional da barragem.

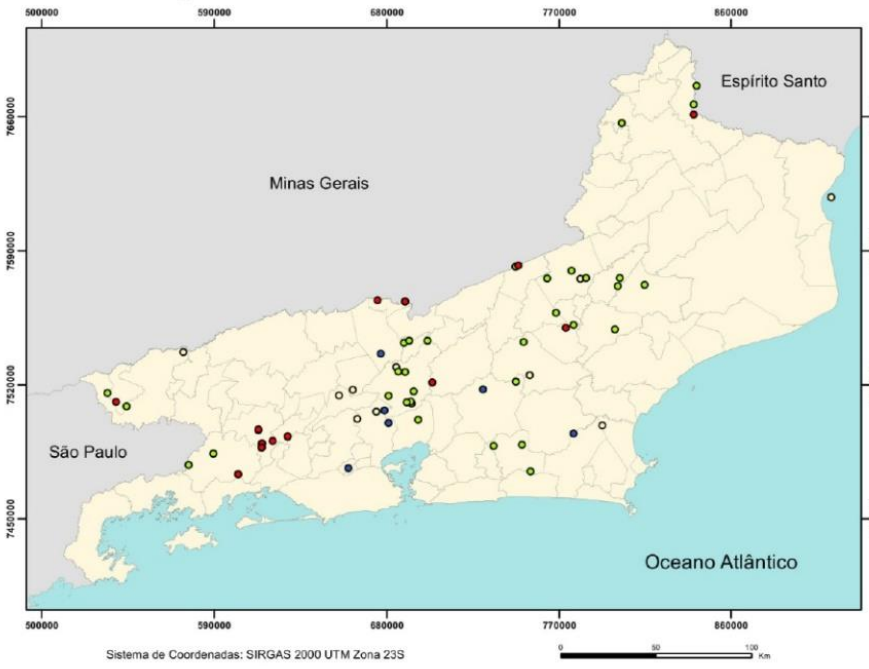
No entanto, “acidentes” desta natureza e complexidade estão sistematicamente atrelados a aspectos e motivações políticas que superam discussões técnicas e ambientais. É comum a realização de auditorias aprovando laudos forjados que atestam condições operacionais em obras de

engenharia claramente já comprometidas. Contudo, esta é uma discussão que não cabe aqui.

Ademais, sugere-se que o conhecimento técnico relativo à instrumentação de auscultação deva ser expandido, ou seja, passando a abranger técnicas mais modernas, qualitativas e quantitativas, que permitam a visualização interna dos maciços sem que seja necessário recorrer a ensaios mecânicos invasivos. Uma aproximação entre o setor privado e a academia atenderá ao propósito de modernização da tecnologia disponível no mercado, mas também possibilitará a formação e especialização de novos profissionais, em especial porque novos projetos de pesquisa tenderão a surgir. Vale ressaltar que novas áreas de estudo deverão ser requisitadas para que o projeto atenda a tais propósitos e conquiste maior visibilidade. Os mapas a seguir mostram diversas barragens no estado do Rio de Janeiro, conforme classificado pela Agência Nacional de Águas (Figura 1.1A) e Instituto Estadual do Ambiente (Figura 1.1B) e que, poderiam ser alvo de estudos futuros.

A geofísica aplicada é bem-sucedida em práticas relacionadas a prospecção mineral e, para tanto, utiliza das mesmas técnicas que foram empregadas neste projeto de mestrado. Métodos elétricos, como a tomografia de resistividade elétrica, potencial espontâneo e polarização induzida são amplamente utilizados na prospecção de água subterrânea, extração de minério (ferro, ouro, prata, zinco, chumbo, cobre, dentre outros), na indústria do petróleo e até mesmo no mapeamento e remediação de áreas contaminadas. Outra técnica geoeletrica pouco invasiva, não abordada no presente projeto, porém muito útil em estudos ambientais e de prospecção, é o potencial espontâneo, que se baseia na medição da diferença de potencial entre dois eletrodos, posicionados sobre o alvo de interesse.

Não obstante, o radar de penetração do solo é extremamente útil na detecção de objetos em subsuperfície, em profundidades rasas, além de possibilitar a determinação das relações de contato (padrões geométricos e profundidade de ocorrência) entre estruturas geológicas. Portanto, é possível que a combinação destes métodos seja satisfatória em um estudo de barragens.

A**Barragens Prioritárias no Estado do Rio de Janeiro - ANA**

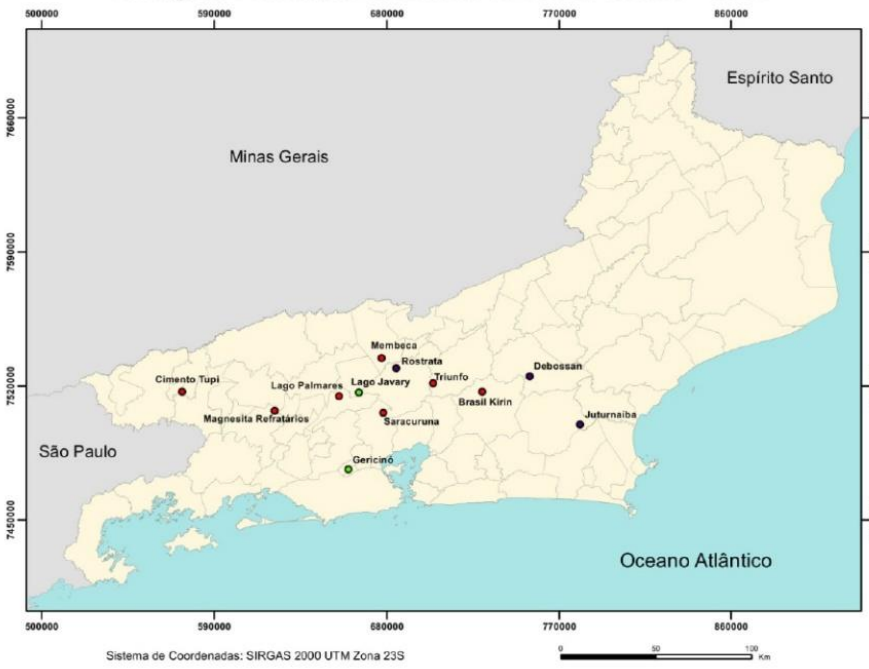
Legenda
Tipos de Barragens

- Concreto
- Terra
- Terra-enrocamento
- Sem informação

Escala
 1:2.500.000



Lucca Martins Franco
 Programa de Pós-Graduação em Geofísica
 Observatório Nacional - 2019

B**Barragens Prioritárias no Estado do Rio de Janeiro - INEA**

Legenda
Tipos de Barragens

- Concreto Armado
- Terra
- Terra e Concreto
- Limites Municipais

Escala
 1:2.500.000



Lucca Martins Franco
 Programa de Pós-Graduação em Geofísica
 Observatório Nacional - 2019

Figura 1.1. Principais barragens no estado do Rio de Janeiro, classificadas de acordo com o material de sustentação, segundo a Agência Nacional de Águas – ANA (A) e o Instituto Estadual do Ambiente – INEA (B).

2. BARRAGENS DE CONTENÇÃO – REVISÃO TÉCNICA

É definido como barragem de contenção o elemento estrutural projetado transversalmente a uma bacia de drenagem com finalidade de acumulação em reservatório artificial. Conforme a definição, tal tipo de estrutura é destinada ao aproveitamento hidrelétrico, regularização do curso e vazão d'água para navegação, abastecimento doméstico e industrial, controle de inundações, irrigação, recreação e fins de saneamento básico (Chiossi, 2009). As barragens de contenção de rejeito mineral representam uma categoria de uso mais específica, com legislação, categoria de risco e dano próprias. Estas não são abordadas, na literatura geotécnica tradicional, junto às barragens de água.

A construção de uma barragem envolve uma série de estudos e fases prévias a implementação que tem como finalidade avaliar a estabilidade geológica do terreno e determinar o tipo de estrutura de contenção e as dimensões ideais a serem utilizadas, visando-se minimizar riscos. Contudo, mesmo em obras projetadas e construídas segundo os critérios de segurança adequados, não é possível eliminar por completo alguma margem de risco (Marcos Marcos Filho et al., 1998).

Barragens são, *a priori*, estruturas condicionadas alterações naturais de estabilidade geológica ou climática e que possuem uma dinâmica interna complexa, além de estarem sujeitas a problemas geotécnicos tradicionais, como problemas de fundação e desgaste mecânico de materiais. Portanto, é essencial uma avaliação rigorosa e multidisciplinar, geológica, geotécnica e hidrogeológica, para que a estrutura seja considerada funcional.

No presente trabalho emprega-se como critério para classificação de barragens, o tipo de estrutura utilizada. De maneira simplificada, existem barragens de concreto (concreto-gravidade, gravidade aliviada ou contrafortes e em arco) e barragens de aterro (terra ou enrocamento). Cada uma tem exigências de fundação, projeto de construção e estruturas secundárias específicos. O projeto prioriza as barragens de terra com alteamento a montante, a exemplo da barragem na qual o estudo foi executado.

2.1 Tipos de Barragem

2.1.1 BARRAGENS DE CONCRETO-GRAVIDADE

São aquelas cuja estabilidade é garantida pelo peso da estrutura e largura de sua base (Massad, 2003), sendo necessário, contudo, que a fundação apresente parâmetros de resistência e deformabilidade adequados. Além disso, é o tipo de barragem mais estável e que apresenta menor custo de manutenção (Figura 2.1). A altura da estrutura é limitada à coerência da fundação, sendo que se impõe o limite de 20 m para barragens construídas sobre material aluvionar inconsolidado (Chiossi, 2009).



Figura 2.1. Barragem de Willow Creek, em Óregon (Estados Unidos), um exemplo de estrutura do tipo concreto-gravidade com alta estabilidade (de US Army Corps of Engineers, 2009).

A subpressão atua de baixo para cima e está associada a água que preenche os poros e interstícios entre a barragem e a fundação ou descontinuidades (Massad, 2003). A redução deste esforço é feita através da injeção de calda de cimento na fundação ou com a abertura de drenos próximo a base e o parâmetro de montante. Na avaliação de tensões, também é considerado o efeito do empuxo hidrostático gerado pelos sedimentos acumulados a montante e os esforços momentâneos causados por sismos (Chiossi, 2015).

Neste tipo de barragem, os mecanismos de ruptura mais recorrentes são o tombamento e deslizamento.

O tombamento é caracterizado pela rotação da estrutura em torno de um ponto fixo após o acúmulo de esforços de tração e aumento da subpressão à montante e aumento da compressão à jusante. O mecanismo de deslizamento é mais comum e pode ser explicado como o deslocamento da estrutura em direção à jusante, sobre uma superfície, ou plano de fraqueza, pouco resistente ao cisalhamento (Marcos Filho et al., 1998). Em geral, tal superfície corresponde à base da barragem ou uma zona de fraqueza na fundação, a qual pode ter sua origem associada a dissolução de material ou percolação de fluidos.

A ruptura por deslizamento é mais frequente nos casos em que a descontinuidade de baixa resistência ao cisalhamento é sub-horizontal e com ocorrência restrita ao contato concreto-rocha. Superfícies mais inclinadas, com ângulo superior a 30° , tendem a ser mais estáveis, embora possam favorecer a ocorrência de problemas de recalque diferencial ou o surgimento de zonas de mais alta permeabilidade. (Marcos Filho et al., 1998).

É essencial que o esforço total sobre a fundação não exceda a tensão admissível da rocha ou concreto. O maior esforço de compressão ocorre no pé de jusante, com o reservatório cheio. A ordem de grandeza deste esforço, em Mpa, é estimada com base na relação $2,5 H/100$, sendo H a altura da barragem.

2.1.2 BARRAGENS DE GRAVIDADE-ALIVIADA E CONTRAFORTES

Uma barragem de gravidade-aliviada tem como principal característica a base que, por ocupar uma área reduzida, apresenta a tendência de diminuição dos valores de subpressão (Massad, 2003). O peso da água sobre o parâmetro de montante impossibilita a ocorrência de tombamento. No entanto, ocorre aumento dos esforços compressivos sobre os contrafortes, chegando a atingir valores da ordem de 4,0 a 4,5 MPa (Marcos Filho et al., 1998).

A estrutura em contrafortes é mais leve, quando comparada às barragens de concreto-gravidade, representando uma economia de 25 a 40% de concreto. Portanto, é necessário um tratamento de fundação mais complexo, sendo necessária a construção de chavetas de concreto e, até mesmo, atirantamento.

A aplicação destes procedimentos objetiva a redução do risco de ruptura por deslizamento, bastante recorrente neste tipo de barragem.

2.1.3 BARRAGENS EM ARCO

Nestas, a estabilidade está associada a forma curva, que tende a transferir as tensões geradas pelo peso da água para as ombreiras. Porém, é essencial que o vale seja regular e estreito, ou seja, a razão entre o comprimento da crista e a altura máxima da barragem (L/H) deve ser igual ou inferior a 5. A maior economia de concreto ocorre quando a razão (L/H) é inferior a 3. As exigências para a fundação são grandes, sendo necessário posicionar a estrutura diretamente sobre a rocha sã (Marcos Filho et al., 1998).

Os esforços de compressão são superiores em comparação a outros tipos de barragem, atingindo valores próximos a 7 MPa. Módulos de deformabilidade baixos e variações de resistência ao longo da base tornam inviável a construção de uma barragem em arco, sendo necessária uma razão (E_m/E_c) inferior a 1/10. É também essencial que o eixo principal da estrutura não esteja posicionado sobre alguma estrutura geológica (falhas, fraturas ou zonas de cisalhamento).

A geometria da estrutura em arco é projetada para que a barragem fique engastada no talvegue de vales fechados (Figura 2.2). Portanto, deve haver compatibilidade entre a estrutura do concreto e do maciço rochoso, ou seja, deve-se conhecer o módulo de elasticidade da rocha (Massad, 2003).



Figura 2.2. Barragem de Glen Canyon, no curso do rio Colorado, Arizona (Estados Unidos), um exemplo de estrutura em arco. Na figura, é possível observar o estreitamento do talvegue, muito profundo e inciso, além da estrutura de concreto engastada nas ombreiras, diretamente sobre o arenito da Formação Navajo, no vale do rio Colorado (de Vicente Villàmon, Flickr, 2009).

2.2 Barragens de Aterro

Barragens de aterro são, de maneira simplificada, subdivididas em enrocamento e terra, embora existam casos não convencionais em que o material de sustentação dos taludes é misto, ou seja, utiliza tanto de enrocamento quanto de terra e, por vezes, uma face de concreto à montante.

O enrocamento é um tipo de aterro constituído por fragmentos de rocha ou cascalho compactado, em camadas, com rolo vibratório. A estrutura deve ser livre drenante, ou seja, ausente de material fino capaz de induzir poropressões. Contudo, a utilização de solos de granulometria fina, em proporções adequadas, tende a tornar o material mais resistente. O elevado ângulo de atrito interno do enrocamento minimiza as chances de deslizamento de taludes (Marcos Filho et al., 1998). Tal estrutura é suportada, preferencialmente sobre fundações resistentes, podendo, no entanto, ser implementada em regiões de rochas alterada, saprolitos, aluviões compactados e demais materiais que apresentem

compatibilidade de deformabilidade e resistência ao cisalhamento com o material de sustentação utilizado na barragem.

As barragens de enrocamento não são priorizadas neste projeto, uma vez que os métodos selecionados para a pesquisa (tomografia de resistividade elétrica, polarização induzida e GPR) apresentam intensidade de sinal limitada para terrenos sólidos, rochosos, de maneira que o dado penetra em profundidades muito reduzidas e resulta em dados extremamente ruidosos. O enfoque aqui são barragens de terra, discutidas em detalhe no item seguinte, e cuja constituição argilosa permite penetração de corrente elétrica e do sinal eletromagnético.

2.2.1 BARRAGENS DE ENROCAMENTO

O enrocamento é um tipo de aterro constituído por fragmentos de rocha ou cascalho compactado, em camadas, com rolo vibratório. A estrutura deve ser livre drenante, ou seja, ausente de material fino capaz de induzir poropressões. Contudo, a utilização de solos de granulometria fina, em proporções adequadas, tende a tornar o material mais resistente. O elevado ângulo de atrito interno do enrocamento minimiza as chances de deslizamento de taludes (Marcos Filho et al., 1998)

Tal estrutura é suportada, preferencialmente sobre fundações resistentes (Chiossi, 2015), podendo, no entanto, ser implementada em regiões de rochas alterada, saprolitos, aluviões compactados e demais materiais que apresentem compatibilidade de deformabilidade e resistência ao cisalhamento com o material de sustentação utilizado na barragem.

A utilização do enrocamento é viável quando o custo do concreto é elevado ou quando há escassez de material terroso. Também deve haver um sítio de extração de rocha dura e resistente próximo ao local onde a barragem será instalada, de maneira a minimizar os custos de transporte. Dentre as rochas mais utilizadas em aterros, destacam-se o basalto maciço, diabásio, granito e gnaiss, sendo, estas, bastante resistentes ao intemperismo físico e químico, além de duras (Chiossi, 2009).

Nesta categoria, são mais comuns as barragens de enrocamento com núcleo de argila, ou *Earth Core Rock Dams* (ECRDs). Estas, são conhecidas como barragens de terra-enrocamento, segundo denominação informal. São caracterizadas por enrocamento nos espaldares (taludes externos), o que garante elevado ângulo de atrito interno à estrutura. Um núcleo interno, argiloso, garante estanqueidade à estrutura, tornando-a impermeável (Massad, 2003).

A porção interna, de baixa permeabilidade, pode estar centrada paralelamente ao eixo da barragem ou de maneira inclinada, em direção à montante. A primeira configuração é utilizada quando a argila e o enrocamento apresentam compressibilidade similar, ao passo que o segundo é mais adequado no caso em que a argila é mais compressível e, portanto, tende a recalcar mais.

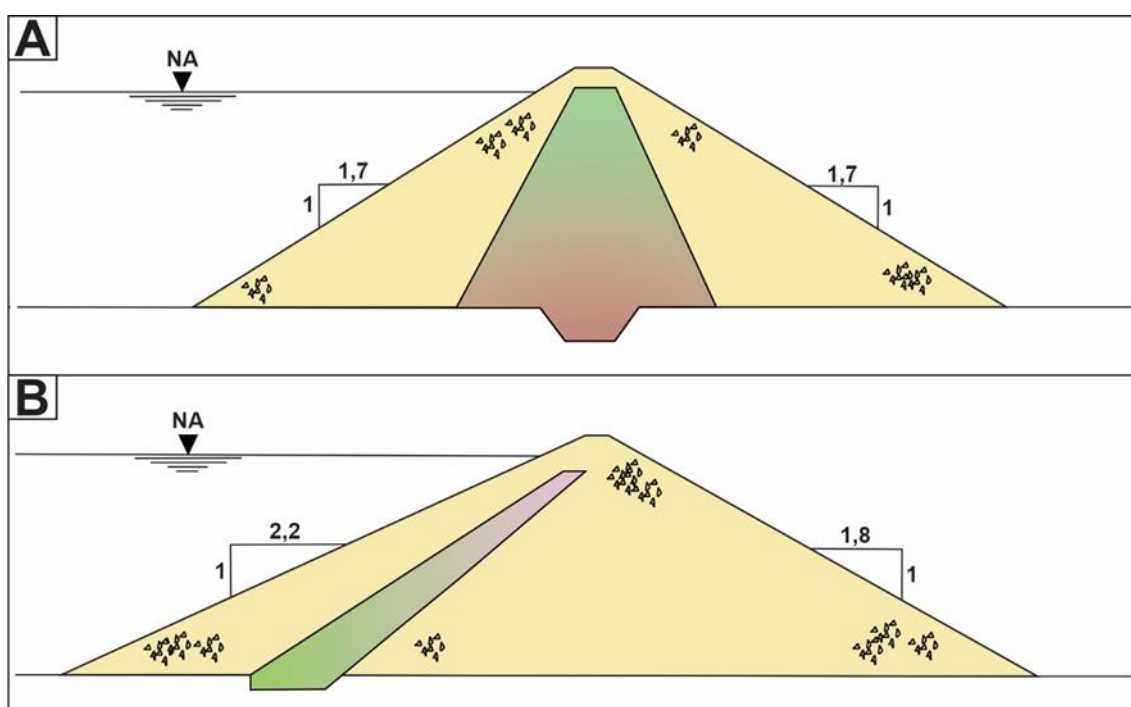


Figura 2.3. Esquema ilustrativo de barragens de enrocamento com núcleo de argila, ou *Earth Core Rock Dams* (ECRDs). Em (a) o núcleo argiloso é centrado paralelamente ao eixo da barragem. Em (b) o núcleo apresenta inclinação em direção à montante (Modificado de Massad, 2003).

Outro tipo de barragem, nesta mesma categoria, são as barragens de enrocamento com face de concreto, ou *Concrete Face Rock Dams* (CFRDs), as quais apresentam um septo impermeável composto por placas de concreto

sobre o talude de montante (Massad, 2003). Abaixo do concreto, uma transição de enrocamento fino, bem graduado, é utilizada. Sobre o núcleo, costuma-se regularizar a superfície da rocha com concreto denominado “dental”, o que impede que eventuais infiltrações carregem solos para dentro da estrutura (Marcos Filho et al., 1998).

A exigência, nestas, é maior, pois o gradiente hidráulico sobre a face de concreto é superior, com relação às ECRDs. A vantagem nas CFRDs é a facilidade e cronograma construtivos, dado que estas podem ser implementadas mesmo em estações chuvosas (Massad, 2003).



Figura 2.4. Barragem de Bakun, no curso do rio Balui, Malásia. A estrutura é um exemplo de barragem de enrocamento com face de concreto, ou *Concrete Face Rock Dam* (CFRD). Na foto, é possível observar a face de concreto voltada a montante e o enrocamento no talude de jusante (de Gordan & Adnan, 2017).

2.2.2 BARRAGENS DE TERRA

Registros históricos sugerem que as primeiras barragens de terra foram construídas pelos povos mesopotâmicos e, posteriormente, egípcios para a finalidade de armazenamento de água para a irrigação, com variável taxa de

sucesso. Thomas (1976) apresenta um exemplo de 4800 a.C, no qual uma barragem de 12 m de altura, construída no Egito, se rompeu após um problema de transbordamento. Em 504 a.C, no atual Sri Lanka, foi construída uma barragem de 17 km de comprimento, 21 m de altura e com capacidade para armazenar cerca de 15 milhões de metros cúbicos de água. O projeto era realizado através de métodos empíricos, sem nenhum tipo de direcionamento técnico ou imposição de procedimentos adequados de segurança (Chiossi, 2009).

Os casos citados antecedem a construção das barragens de concreto-gravidade e arco, introduzidas pelos romanos em 100 d.C. Na antiguidade, estruturas de terra eram internamente homogêneas, feitas de material transportado manualmente e compactado por meio do pisoteamento de animais. As barragens de enrocamento e a compactação mecânica foram introduzidas apenas em meados do século XIX, durante a revolução industrial e, portanto, bem antes da mecânica de solos e rochas ser estabelecida como ciência (Massad, 2010).

Mesmo hoje, barragens de terra são consideradas obras elementares, aplicáveis a qualquer tipo de fundação, desde rochas duras até material inconsolidados (Chiossi, 2015), e com considerável variabilidade de projeção, conforme discutido à frente. No Brasil é o tipo de barragem mais comum, devido a disponibilidade de material terroso e a predominância de vales abertos, pouco incisos (Figura 2.6).



Figura 2.5. Barragem Casa de Pedra, de propriedade e uso da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Congonhas (MG), um exemplo de barragem de terra com alteamento a montante. Este tipo de estrutura é muito comum no Brasil devido à grande disponibilidade de material terroso e custo de instalação reduzido (de Rodrigues, 2019).

Com relação ao material de sustentação, são realizadas com solos de granulometria fina a grossa, de baixa permeabilidade e com comportamento hidráulico condicionado às poropressões. Em geral, são constituídas por alteamentos, ou camadas delgadas de terra, compactadas entre si com rolo vibratório. Os tipos mais comuns são as barragens homogêneas e as zonadas (Marcos Filho et al., 1998), conforme ilustra a figura 2.7.

As **homogêneas** são realizadas com apenas um tipo de solo, em geral argiloso e de baixa permeabilidade, sem variação granulométrica ou graduação. Os talúdes de montante e jusante devem ser abatidos, da ordem de 2,5 a 2,0 H:1V, de maneira a assegurar sua estabilidade, evitando escorregamentos internos e erosão (Marcos Filho et al., 1998).

As **zonadas** apresentam um núcleo central impermeável, constituído de material argiloso, e dois taludes externos ou espaldares, realizados com material granular mais permeável (areia e cascalho), além de resistente a deslizamentos. Este mesmo tipo de barragem pode ser realizado com um mesmo tipo de material de empréstimo, porém compactado com variação das condições de umidade. Ou seja, ocorre uma transição entre solos úmidos, na parte central, e solos mais secos, nos espaldares (Massad, 2010).

Em ambas a transmissão de esforços para a fundação é baixa, o que permite a implementação sobre solos ou rocha intemperizada, com a condição de que exista compatibilidade de deformabilidade e resistência com os materiais utilizados na sustentação da barragem.

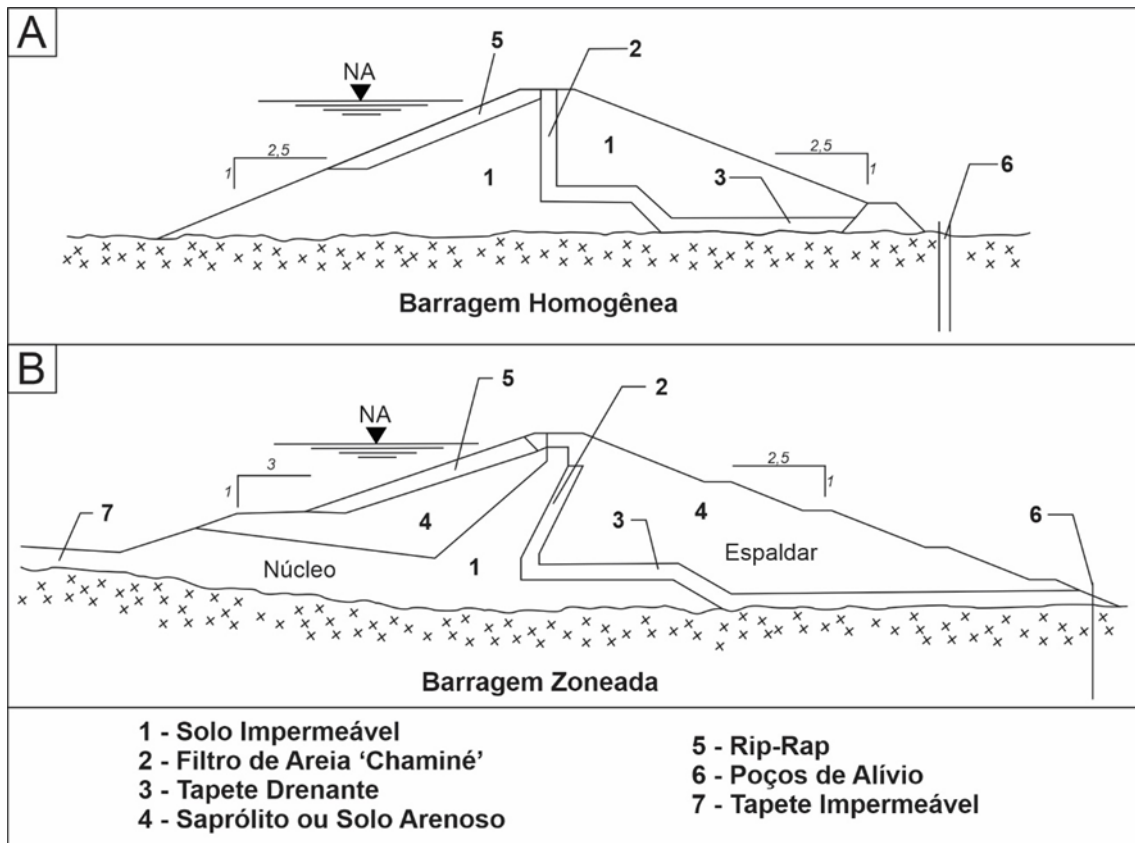


Figura 2.6. Esquema ilustrativo das barragens de terra (A) homogênea e (B) zonada, além dos elementos básicos constituintes de cada uma delas. É possível observar o abatimento dos taludes através da razão de 2,5 H:1V. Estruturas associadas ao controle da fundação estão presentes em ambas (Modificado de Marcos Filho et al., 1998).

Segundo Filho et al. (1998), os principais mecanismos responsáveis por acidentes em barragens de terra são o galgamento (*overtopping*), erosão interna (*piping*), deslizamento de taludes e fissuramento.

O fenômeno de ***overtopping*** caracteriza a mais frequente causa de acidentes e está relacionado a erosão gerada pela passagem de água sobre a crista da barragem (galgamento), em períodos de intensa precipitação com cheia do reservatório. Para se evitar o galgamento, a altura da crista da barragem deve apresentar uma margem de segurança, ou borda livre, sobre o nível do reservatório. As estruturas de desvio, como o vertedouro e os descarregadores de cheia, também devem ser bem planejadas. Vale colocar que a inclinação do talude de jusante tem influência sobre velocidade da lâmina d'água em caso de transbordamento, o que, portanto, está relacionado a intensidade da erosão da crista.

O fenômeno de *piping* ou erosão interna regressiva, consiste no carreamento progressivo de partículas do solo de jusante a montante, por ação de um fluxo d'água. Como consequência da erosão interna, é gerado um conduto no ponto de surgência, que avança em direção a montante (entubamento). Atualmente é aceito que o desempenho e geometria dos filtros e tapete drenante também estão relacionados a ocorrência de *piping* (Richards, 2007). Dentre os incidentes envolvendo barragens de terra, estima-se que 46% estejam associados ao fenômeno (Foster et al., 2000).

Richards et al., (2007) categoriza o fenômeno em quatro categorias:

- *Piping* associado à fundação.
- Erosão interna regressiva nos taludes, com início no parâmetro de jusante e avanço à montante, formando um conduto interno.
- Avanço da erosão em fraturas ou fissuras internas ao maciço da barragem, as quais permitem a concentração de fluxo de água (do reservatório) e que tende a se acumular quando próximo a um ponto de saída (filtro).
- *Piping* gerado por atividade biológica.

Foster et al., (2000) propões uma categoria específica de *piping*, associada ao carreamento de solos finos e mal graduados, que tendem a escapar por meio da matriz granular, gerando condutos internos (Figura 2.8).

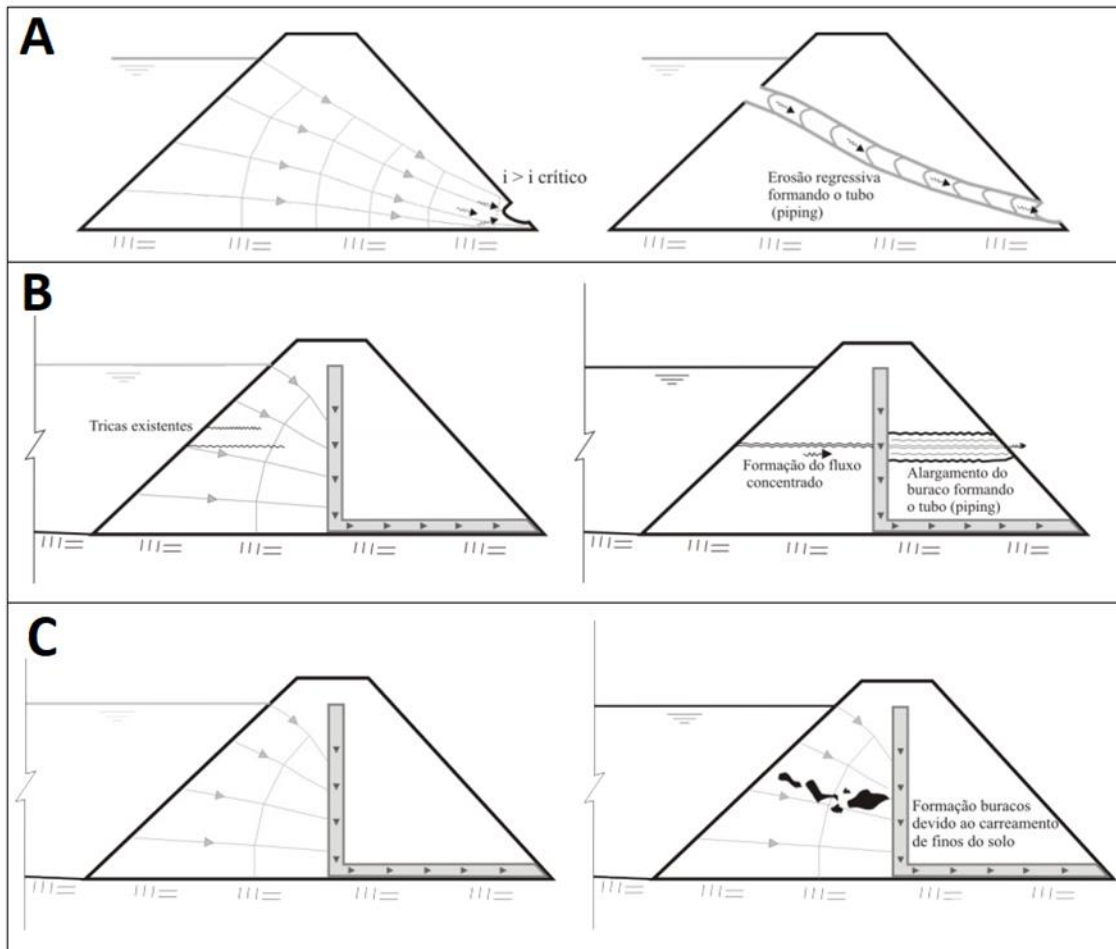


Figura 2.7. Três tipos existentes de *piping* descritos na literatura. Em (A) é caracterizada a erosão interna regressiva, com formação de conduto. Em (B) é ilustrado o *piping* associado a concentração de fluxo e alargamento de fissuras pré-existentes no maciço. Em (C) é ilustrado o processo de formação de *piping* por carreamento de finos (Modificado de Perini, 2009).

Tal processo tende a ocorrer em aterros realizados com solos dispersivos, ou seja, de granulometria fina e baixa coesão. Porém, o gradiente hidráulico no ponto de emergência deve se igualar ou ultrapassar um valor crítico, que equivale a razão entre o peso específico do solo submerso e o peso específico da água (esta relação se aproxima a 1 na maior parte dos solos). Areias finas de baixa compactidade e pequeno peso específico são mais susceptíveis a erosão, ao passo que materiais mais densos (casalhos) e coesivos (argila compactada) são mais confiáveis, com exceção ao caso em que o gradiente hidráulico é muito elevado.

São diversas as causas deste tipo de erosão, assim como a região da barragem em que o processo tem início, podendo ser na fundação ou corpo da

barragem, no ponto em que a água entra em contato com a superfície externa e, também, na transição entre o núcleo e um filtro mal dimensionado ou enrocamento adjacente (Marcos Filho et al., 1998).

O *piping* promove a ruptura, ou instabilidade do talude, se ocorre o alargamento substancial do conduto (ou tubo) gerado no maciço, rebaixamento ou geração de vesículas (*skinholes*) na região de crista, escorregamento no talude de jusante devido à saturação ou aumento de poropressão, com desagregação (liquefação) da base da barragem (Foster et al., 2000). O último mecanismo tende a ocorrer quando o peso dos grãos de solo se iguala à subpressão, ou seja, as forças que atuam verticalmente se anulam, resultando em perda de coesão e desagregação do material.

Análises estatísticas mostram que se o *design* dos filtros fosse realizado corretamente, o número de ocorrências de *piping* diminuiria drasticamente (Richards et al., 2007). O material fino e dispersivo que é carregado para dentro dos filtros tende a aderir na superfície do dreno, obstruindo a passagem da água e reduzindo a condutividade hidráulica. Como consequência, tende a haver um aumento das poropressões e, subsequente, liquefação e perda de coesão (Sherard et al., 1977).

O efeito da infiltração é prevenido com a utilização de drenos verticais ou inclinados (em chaminé) continuados por drenos horizontais, posicionados entre a base e a fundação (tapete drenante). Estes drenos são constituídos por areia e brita e atuam como filtro, permitindo a livre passagem de água, porém retendo as partículas do solo que constituem o aterro. Os filtros são essenciais no controle das subpressões, pressões e percolação e erosão interna. Na fundação, a infiltração é evitada por meio da injeção de impermeabilização e a construção de *cutt-offs*, que consiste na implementação de trincheiras de vedação preenchidas com solo compactado, diafragmas de cimento e argila ou, ainda, tapetes impermeáveis (Marcos Filho et al., 1998).

O padrão de *design* utilizado como base é o critério de filtro de Terzaghi (1922), considerado o pai da mecânica de solos. Consiste em um índice que equivale à razão entre o diâmetro da partícula utilizada no filtro (D_{filtro}) e no solo (D_{solo}). Para prevenção de *piping*, adota-se:

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (2.2)$$

Para garantir a passagem de água pelos drenos, adota-se:

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (2.3)$$

Terzaghi ainda conseguiu determinar a largura dos filtros vertical e horizontal por meio da Lei de Darcy, a qual afirma que a velocidade de percolação é proporcional ao gradiente hidráulico, ou seja:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.4)$$

Sendo **Q** a vazão, **K** o coeficiente de permeabilidade do solo e **A** a área transversal ao escoamento.

Nos filtros verticais, o gradiente hidráulico equivale a 1 e, portanto:

$$Q = K \cdot A = K \cdot (B \cdot 1) = K \cdot B \quad (2.5)$$

O diâmetro do filtro, será:

$$B = \frac{Q}{K} \quad (2.6)$$

Para filtros horizontais e conforme a Lei de Darcy, pode ser utilizada a relação a seguir,

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot L}{K}} \quad (2.7)$$

A *teoria de arraste*, proposta por Bligh (1910), explica a dinâmica do fluxo da água em um meio granular. Seu aspecto mais importante é o de que a descarga hidráulica, assim como a velocidade da água, tem relação de proporcionalidade direta com o gradiente hidráulico (ΔH) e inversa com o comprimento do fluxo (L), o qual é igual a somatória das distâncias vertical e horizontal percorridas pelo fluxo. O fator de percolação, descrito na equação de Bligh, a seguir, é um estimador empírico de resistência do solo contra a erosão.

$$c = \frac{L}{\Delta H} \quad (2.8)$$

Posteriormente, Lane (1934) notou que a distância horizontal seria, em média, três vezes menos efetiva que a vertical na percolação de água, em um fluxo anisotrópico. A partir de então o parâmetro **L** passou a ser dividido por 3, no cálculo do fator de percolação, agora denominado fator de arraste (Richards et al., 2007). O autor pôde, então, elaborar uma relação de valores recomendados de coeficiente de arraste para cada intervalo granulométrico (Tabela 2.2).

Tabela 2.1. Relação entre o coeficiente de arraste (Lane, 1934) e a granulometria do solo

Solo	Coefficiente de Arraste Recomendado
Areia muito fina ou silte	8,5
Areia fina	7
Areia média	6
Areia grossa	5
Cascalho fino	4
Cascalho médio	3,5
Cascalho grosso e Calhau	3
Blocos com calhau e cascalho	2,5
Argila mole	3
Argila média	2
Argila rija	1,8
Argila dura	1,6

O mecanismo de **deslizamento de taludes**, já discutido nas demais categorias de barragem, ocorre de diversas maneiras em aterros, conforme descreve Filho et al., (1998):

- Deslizamento no momento da construção
- Deslizamento do parâmetro de jusante após infiltração
- Deslizamento do parâmetro de montante por depleção do reservatório
- Deslizamento favorecido por defeitos de fundação e geometria interna
- Deslizamento por ocasião de abalo sísmico

De maneira geral, a configuração mecânica que resulta em um deslizamento ocorre quando as tensões cisalhantes ao longo de uma determinada superfície excedem a resistência do material de sustentação. Estão associadas ao desenvolvimento de poropressões e pressões de percolação.

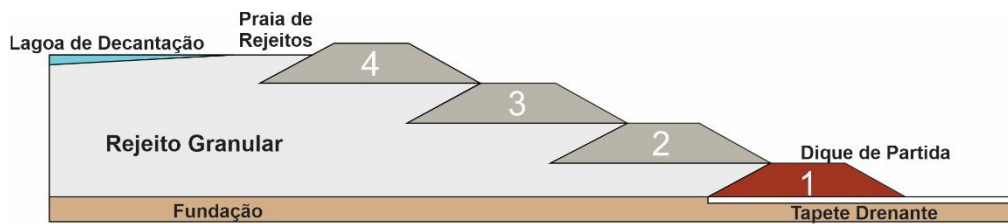
Planos de fraqueza no contato entre a base e fundação, ou descontinuidades ao longo da estrutura, favorecem tal tipo de ruptura. Um horizonte de alteração pedogenética, camada de argila mole ou uma zona mais permeável ou fraturada são fatores que tornam a estrutura mais susceptível a deslizamentos.

2.2.2.1 barragens de rejeito de minério

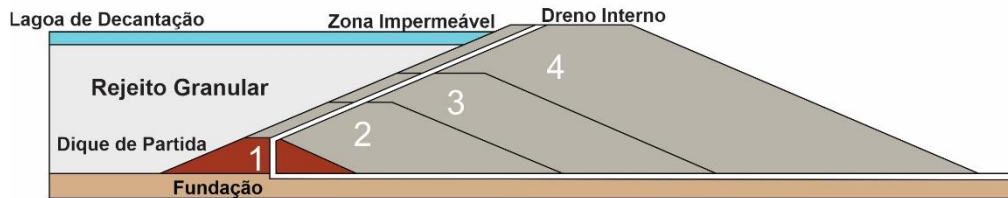
As barragens de rejeito são utilizadas para a decantação e armazenamento do material proveniente do beneficiamento mineral. Por não apresentar valor econômico algum, o rejeito é descartado da maneira mais econômica possível. Portanto, estas barragens são projetadas segundo critérios de segurança pouco rigorosos, em comparação às barragens de terra utilizadas no armazenamento de água. No entanto, as barragens de rejeito diferem entre si, uma vez que o material armazenado depende do tipo de minério e processo de beneficiamento (Machado, 2007).

Barragens de terra voltadas à contenção de rejeitos de mineração são, em geral, construídas por meio de sucessivos alteamentos, no denominado **método de alteamento**. Tal método envolve a construção de um dique de partida, na base, e vários diques secundários sobrepostos a ele (alteamentos), os quais são realizados com solos compactados, provenientes de áreas de empréstimo ou, até mesmo, com o próprio rejeito (Duarte, 2008).

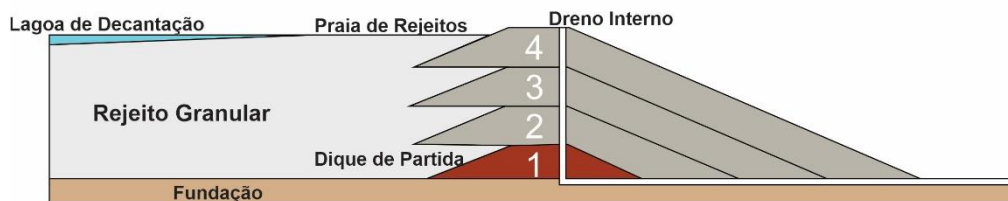
Existem três tipos básicos de alteamento, à montante, à jusante e linha de centro (Figura 2.9). O primeiro método é o mais antigo e barato, embora seja, ainda, o mais utilizado. Inicialmente, o rejeito que resulta do beneficiamento do minério é lançado contra um dique de partida argiloso e impermeável, que é construído sobre a fundação. Forma-se uma região de praia de deposição, próximo a crista e que servirá de fundação e área de empréstimo para a construção do segundo dique. O rejeito é lançado novamente e, caso seja necessária a construção de novos diques, o procedimento é repetido até que se chegue na capacidade desejada (Araujo, 2006). Sob o dique de partida deve ser construída uma trincheira de vedação, para impermeabilização do solo.



Alteamento à Montante



Alteamento à Jusante



Alteamento por Linha de Centro

Figura 2.8. Método de alteamento utilizado nas barragens de rejeito mineral. A primeira figura ilustra o alteamento a montante, método mais comum no Brasil, no qual os aterros hidráulicos são alteados em direção à praia de rejeitos. A segunda figura ilustra o alteamento a jusante, que envolve maior controle construtivo, porém com custos superiores. A última ilustração, mostra o método de linha de centro, no qual os eixos dos alteamentos e do maciço de barragem coincidem.

As dimensões do dique de partida têm relação com a disponibilidade de material argiloso na área de empréstimo e com o volume de rejeitos produzido no processo de beneficiamento durante o tempo de vida útil da mina. Parâmetros geotécnicos também são considerados, em especial o teor de umidade da argila, a resistência do talude construído (após a compactação), além de condicionantes climáticas, como o índice pluviométrico e a distribuição das chuvas no decorrer do ano (Machado, 2007). Assim como em qualquer barragem de terra, é imprescindível a construção de um extravasor de cheias.

O método descrito é o mais econômico e rápido, por utilizar menor quantidade terra e enrocamento e aproveitar a própria disposição de rejeitos na sustentação da barragem. No Brasil, a maior parte dos incidentes envolvendo rompimento ocorre neste tipo de barragem.

A construção de aterros hidráulicos tende a ser desordenada, resultando em taludes instáveis, que se constituem em material não consolidado, saturado em água, com alto índice de vazios e, por conseguinte, susceptível à perda de coesão e a baixa resistência ao cisalhamento. A não adequação dos parâmetros geotécnicos resulta, em boa parte dos casos, em liquefação. O controle e inspeção na fase de implementação é, em geral, pouco rigoroso e a instalação de mecanismos de drenagem interna, precária.

O projeto destas barragens deve prever alguns elementos básicos de controle, tais quais, o nível da água em relação à crista, variação granulométrica e de condutividade hidráulica devido à natureza do rejeito e efeito do gradiente hidráulico sobre a fundação (Machado, 2007). É importante evitar o trânsito de veículos pesados nas proximidades da barragem, assim como detonações com explosivos. A atividade sísmica nas imediações da planta também deve ser monitorada.

O método de alteamento à jusante, por sua vez, tem início com a construção de um dique de partida (de terra ou enrocamento) sobre a fundação, que é compactado com rolo vibratório. Neste caso, os alteamentos são construídos em direção à jusante e não sobre a região de praia, na qual os rejeitos estão dispostos. O controle construtivo e do lançamento de rejeitos é maior e o sistema de drenagem pode ser construído ao longo do processo de alteamento, permitindo maior controle da saturação do material argiloso no interior do talude (Duarte, 2008).

A compactação do material implica em um maior controle das forças de percolação, pois o material torna-se menos permeável. Portanto, o risco de liquefação reduz drasticamente. Contudo, o custo da obra e de transporte de material é muito superior em relação a barragem de rejeito a montante, já que a quantidade de material utilizado é maior. A área ocupada pela estrutura, após a fase de implementação, também será superior.

Por fim, o método de linha de centro consiste em alteamentos realizados na vertical, segundo o mesmo eixo do dique de partida. Neste caso, é possível a utilização de drenos internos em todo o maciço da barragem, o que possibilita o controle das forças de percolação e poropressões (Duarte, 2008). Assim como

no método de alteamento a montante, o rejeito mineral é utilizado como material de sustentação no talude. No caso, o material granular é lançado em direção a montante e jusante a partir da linha de centro e sobre o dique de partida, constituído apenas de argila compactada.

Para contornar o problema da variabilidade granulométrica e composicional do rejeito, utiliza-se um equipamento de concentração gravítica na separação entre materiais com diferentes densidades. A técnica consiste em centrifugar e fluidizar o material, o qual é fracionado em concentrados com intervalos granulométricos próximos. O material grosseiro ou (*underflow*) é lançado contra a jusante, sendo o fino (*overflow*) destinado a montante do eixo, dando origem a praia de rejeitos. O método tende a ser custoso, pois envolve gastos com energia no funcionamento dos equipamentos de centrifugação (Machado, 2007).

3. METODOLOGIA

Durante as etapas de aquisição de dados foram utilizados três métodos geofísicos distintos, sendo estes a tomografia de resistividade elétrica (ERT), polarização induzida (IP) e radar de penetração do solo (GPR). Os itens a seguir tratam um pouco dos aspectos teóricos e práticos que abrangem cada um destes, tratando dos fundamentos teóricos, principais métodos de aquisição de dados, processamento básico e interpretação. Vale lembrar que na proposta de pesquisa entregue ao Observatório Nacional no início de 2019, cogitou-se a aquisição de medidas de potencial espontâneo, a qual não foi realizada devido à indisponibilidade do equipamento adequado.

3.1 Métodos Elétricos

3.1.1 CONCEITOS BÁSICOS

A condutividade/resistividade elétrica estão entre as propriedades elétricas mais utilizadas na geofísica aplicada, pois controlam a resposta de grande parte dos métodos de investigação, dentre os quais se destacam a tomografia de resistividade elétrica (caminhamento elétrico), polarização induzida, potencial espontâneo e, até mesmo, os métodos eletromagnéticos (Dentith & Mudge, 2014). Contudo, existem propriedades específicas, também relevantes (capacitância, polarização elétrica, cargabilidade), que serão abordadas no presente capítulo.

A resistividade elétrica é definida com base na lei de Ohm, a qual define o potencial elétrico (V) como o produto entre a resistência (R) e a corrente elétrica (I):

$$V = RI \quad (3.1)$$

No caso geral, a resistividade elétrica se traduz como a resistência elétrica entre duas faces opostas de um cubo unitário de um determinado material, após aplicada uma diferença de potencial e estabelecida uma corrente elétrica (Halliday et al., 2000). Para um fio cilíndrico condutor (Figura 3.1), homogêneo e

isotrópico, de resistência R, comprimento L e área de seção transversal A, a resistividade ρ é definida como:

$$\rho = \frac{R A}{L} \quad (3.2)$$

No SI a unidade da resistividade é dada por ohm m. A propriedade física que é recíproca, ou inversa, a resistividade é denominada condutividade, a qual é representada pela letra σ e dada em $\text{ohm}^{-1} \text{m}^{-1}$, na forma:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

Outro conceito útil é a densidade de corrente (J), cuja intensidade é definida como a corrente por unidade de área para cada elemento da seção transversal do corpo condutor. Na tomografia de resistividade elétrica e demais métodos elétricos, define-se a densidade para um meio homogêneo, isotrópico, no qual as superfícies equipotenciais elétricas são semiesféricas em subsuperfície:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.4)$$

Na equação 3.4, o termo $2\pi r^2$ representa a área superficial de uma semiesfera de raio r.

O potencial elétrico (V) pode ser definido a partir do parâmetro densidade de corrente, representando a variação da voltagem no semiespaço, da seguinte maneira:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3.5)$$

A determinação da voltagem é essencial em aquisições de eletrorresistividade, pois permite o cálculo da resistividade aparente, parâmetro essencial e que apresentado no item relativo à tomografia de resistividade elétrica.

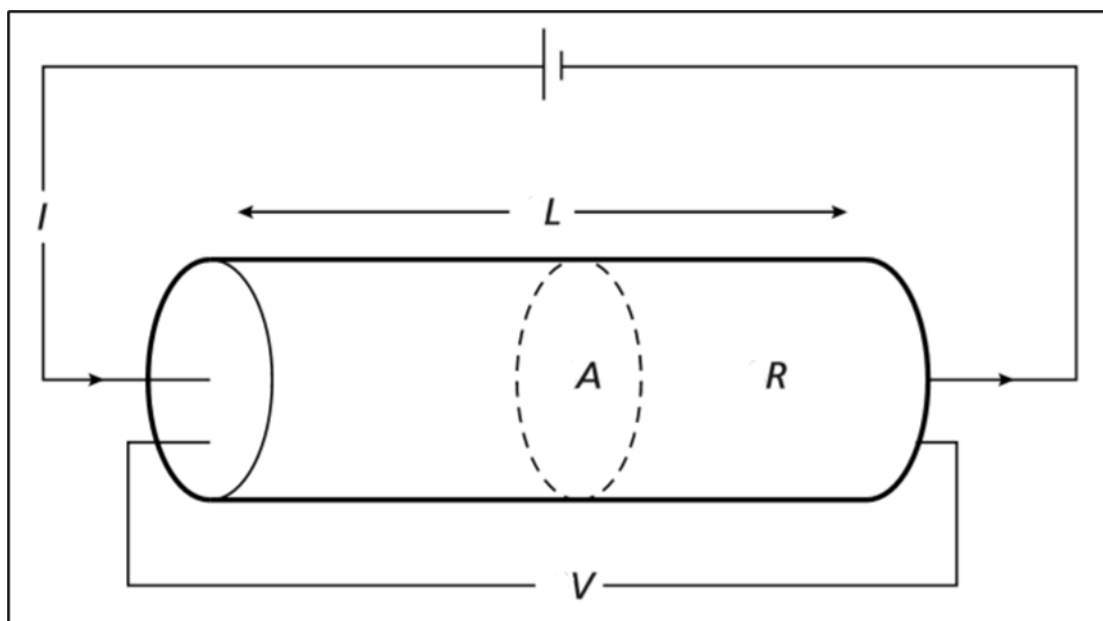


Figura 3.1. Cilindro condutor isotrópico, hipotético, com seção reta uniforme. Estão indicados os parâmetros de resistência elétrica (R), área da seção transversal (A) e comprimento (L), os quais são utilizados no cálculo da resistividade (Kearey et al., 2002).

3.1.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS GEOLÓGICOS

Em materiais de origem geológica, como rochas, solos e sedimentos inconsolidados, as propriedades elétricas apresentam um comportamento bastante complexo e que está, muitas vezes, associado a presença de fluidos nos poros, grau de faturamento, presença de sulfetos e metais disseminados na matriz, composição química e estrutura da rocha. A representatividade da resposta obtida nos levantamentos também tem relação com a escala utilizada (Dentith & Mudge, 2014), sendo que o comportamento tende a tornar-se mais homogêneo em escalas regionais.

Tais propriedades exibem grande variação em meios geológicos, razão pela qual são tão úteis em estudos de subsuperfície. De maneira geral, os principais minerais formadores de rocha (quartzo, feldspato, carbonatos, piroxênios e anfibólios) comportam-se como isolantes, não permitindo passagem significativa de corrente. Na natureza, também se destacam os semicondutores, que agrupam parte significativa das rochas sedimentares, ígneas e metamórficas. O grupo dos sulfetos, a grafita, os metais nativos e alguns óxidos são exceções, pois atuam como condutores (Kearey et al., 2002).

Contudo, a maior parte da condução de eletricidade em profundidades rasas na crosta não ocorre por meio de processos eletrônicos, mas sim a partir de processos eletrolíticos (McNeil, 1980), nos quais predomina a troca iônica em meio fluido. Neste caso, o fluido que infiltra e se desloca por entre os poros, fraturas e juntas do material geológico é o principal responsável pelo controle das respostas de resistividade/condutividade. Dessa forma, o aumento da porosidade do material ou rocha tende a refletir uma diminuição da resistividade e aumento da condutividade. Rochas cristalinas, com baixa porosidade, tem sua condutividade condicionada ao grau de faturamento (Kearey et al., 2002).

Em subsuperfície, predominam os fluidos aquosos. Nestes, a condutividade aumenta de forma proporcional a salinidade e conteúdo de impurezas em solução, já que a água pura apresenta baixa condutividade (McNeill, 1980). Para concentrações de água inferiores a 15% do volume total do solo, observa-se que a resistividade decresce rapidamente com o aumento do conteúdo de água (Samouelian et al., 2005). No entanto, a condutividade da água salina tem dependência dos íons que se encontram em solução (H^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^-) e de sua concentração, uma vez que cada um apresenta uma determinada mobilidade iônica. Portanto, é possível que em uma mesma área de estudo, um mesmo solo apresente variações de resistividade, a depender da solução que percola em cada região da vertente, horizonte do manto de alteração ou talude.

Os fatores que controlam a condutividade em meio poroso estão relacionados a uma combinação entre as propriedades mecânicas do material (porosidade, permeabilidade, tortuosidade e saturação em fluido) e físicas do eletrólito (temperatura, salinidade, concentração e mobilidade de íons). A resistividade de um meio poroso livre, ou seja, não obstruído por partículas de silte ou argila, e saturado com água salina é definida por meio da lei empírica de Archie (Dentith & Mudge, 2014). Nesta, é observada proporcionalidade entre a resistividade do meio e o fator de formação (F), definido como a razão entre a resistividade da rocha saturada (ρ) e do fluido (ρ_w) que ocupa os poros:

$$F = \frac{\rho}{\rho(w)} = \frac{a}{\phi^m} \quad (3.6)$$

O fator de formação é uma grandeza adimensional que varia de 5 a 500, sendo que os valores baixos se correlacionam a materiais muito porosos. O fator também se relaciona a porosidade do meio (ϕ), através de outros dois parâmetros, o expoente de cimentação (m) e um fator de escala (a). Estes são controlados por características morfológicas e texturais do material e, em caso de rochas sedimentares, estão relacionados a diagênese. A exemplo, quanto maior a tortuosidade dos poros, maior é o expoente de cimentação.

É importante mencionar que na Lei de Archie, a porosidade calculada representa um valor aparente, pois assume-se os poros do solo saturado são preenchidos apenas por água, não sendo considerada a possibilidade da presença de gás. A equação de Archie foi posteriormente modificada, para que outros fluidos fossem considerados, a exemplo do ar, petróleo, dentre outros (Samouelian et al., 2005). A nova formulação expressa o grau de saturação em água (S) em função do fator de formação (F), resistividade do solo (ρ) e resistividade da água (ρ_w):

$$S^n = \frac{F\rho(w)}{\rho} \quad (3.7)$$

Combinando tal relação com a Lei de Archie, obtém-se:

$$S^n = \frac{a\rho(w)}{\phi^m\rho} \quad (3.8)$$

Sendo, (n) o parâmetro relativo ao grau de saturação do meio poroso. A fórmula é utilizada para solos com granulometria média a grossa, com diâmetro de grãos variando de 0,4 mm a 5 mm (Chiossi, 2015), e considera que a fase fluida não influencia na condução de corrente elétrica. Goyal et al. (1996) propôs uma relação empírica entre a resistividade e o conteúdo de água, considerando duas constantes (a , b), as quais representam características específicas do solo e da água, como temperatura, porosidade e salinidade, para diferentes intervalos de tempo (t). Também se considera o volume de água no solo (θ):

$$\rho_{z,t} = a + b\theta_{z,t} \quad (3.9)$$

O método, embora complexo, é bastante empregado nos casos em que o solo é heterogêneo e apresenta variação temporal no teor de umidade, na temperatura, salinidade e porosidade (Samouelian et al., 2005).

Outro fator que influencia na resistividade de solos saturados é a presença de argilominerais, ou seja, aluminossilicatos hidratados de granulometria fina. As argilas em meio aquoso tendem a liberar íons em solução, de maneira a aumentar a condutividade. Isto pode ser observado, em especial, nas argilas expansíveis do tipo 2:1 (grupo da montmorilonita), as quais possuem elevada capacidade de troca catiônica e, portanto, alta condutividade. Argilominerais do grupo da illita e clorita (minerais não expansíveis) ainda possuem capacidade de liberação de cátions em solução, ao passo que a caolinita (tipo 1:1) pouco contribui para a condutividade do solo.

Outro fator que favorece a condutividade elétrica é o aumento da temperatura da fase fluida no solo. Campbell et al. (1948) mostrou um aumento de condutividade de 2,02% em 30 amostras de solo salino e alcalino, aquecidas de 15° a 35°. O autor ainda propôs uma maneira de se calcular a condutividade das amostras a temperatura de 25 °, por meio da seguinte relação:

$$\sigma_t = \sigma_{25^\circ} [1 + \alpha(T - 25^\circ)] \quad (3.10)$$

O método mostra-se útil em regiões de clima temperado, nas quais a variação de temperatura é periódica, além de significativa (Samouelian et al., 2005).

Portanto são diversos os fatores que afetam a condutividade do material, sendo estes relativos as características geomorfológicas (forma das vertentes, relevo, bacias hidrográficas), hidrogeológicas (nível freático, presença de aquíferos e zonas de recarga, condutividade hidráulica), mineralógicas (estrutura cristalina, composição química, granulometria e grau de seleção, porosidades primária e secundária, permeabilidade), estruturais (fraturamento, presença de falhas e zonas de cisalhamento, comportamento da foliação), dentre outras. A condutividade e resistividade não são propriedades diagnósticas utilizadas na classificação de rochas, uma vez que exibem considerável variação a depender da configuração específica em que o material se encontra. No entanto e apesar da incerteza, é possível estimar o intervalo de resistividade/condutividade que

esperasse obter para alguns minerais e grupos de rochas, conforme mostra a Figura 3.2, a seguir.

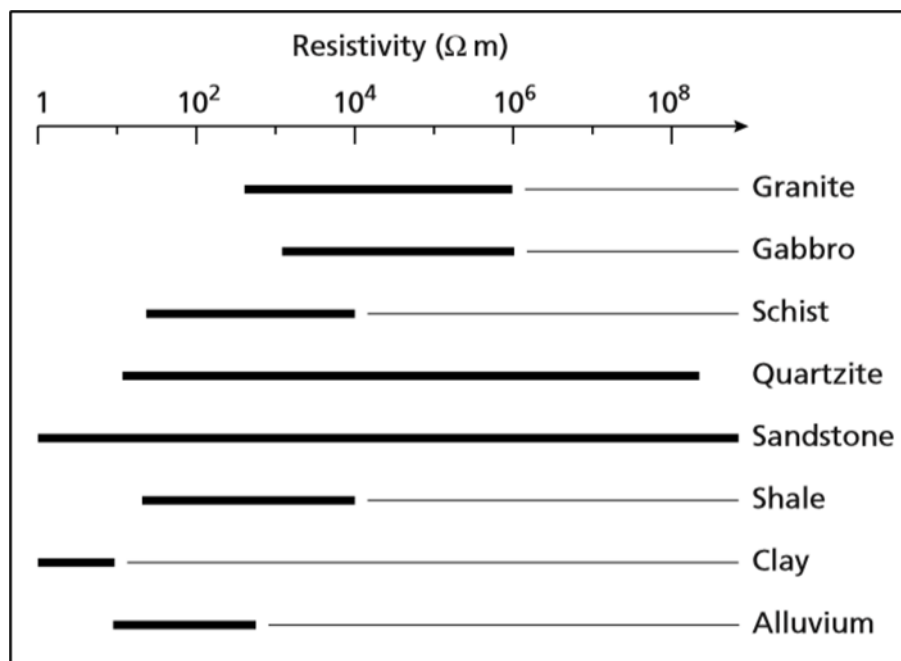


Figura 3.2. Variação da resistividade para os principais materiais geológicos presentes na crosta, os quais estão agrupados em condutores, semicondutores e isolantes (Kearey et al., 2002).

3.2 Tomografia de Resistividade Elétrica - Eletrorresistividade

A técnica de tomografia de resistividade elétrica ou *electric resistivity tomography* (ERT), advém do método da eletrorresistividade e tem como base as variações de resistividade/condutividade em materiais geológicos. A resistividade representa a dificuldade que um determinado material impõe à passagem de corrente elétrica (Bortolin & Filho, 2010), após estabelecida uma diferença de potencial. No caso, é empregada uma corrente artificial, de baixa frequência (menor que 10 Hz), injetada na superfície através de um conjunto de eletrodos, cuja disposição está condicionada a arranjos específicos, conforme discutido à frente.

A partir da amostragem de valores de potencial elétrico, tomados em diferentes pontos, o emprego do método de ERT favorece a delimitação da geometria e disposição espacial de corpos em subsuperfície, assim como suas

relações de contato. Em seguida, são aferidos valores de resistividade, que permitem a distinção dos materiais em subsuperfície.

No método, uma corrente elétrica (I) é injetada a partir de um par de eletrodos metálicos (A, B), ou eletrodos de corrente (transmissores). A diferença de potencial (ΔV) é medida em um segundo par de eletrodos (M, N), ou eletrodos de potencial (receptores), conforme mostra a Figura 3.3. O resultado do ensaio está relacionado não somente às propriedades elétricas intrínsecas do material, mas também ao arranjo utilizado. Se aplicada a Lei de Ohm e considerando um fator de espaçamento (K) é, então, calculada a resistividade aparente (ρ_a), por meio da equação:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad (3.11)$$

O valor expresso por meio da resistividade aparente reflete a heterogeneidade do meio, dada a ocorrência de materiais diversos, com variação nos parâmetros de resistividade e condutividade em uma mesma região.

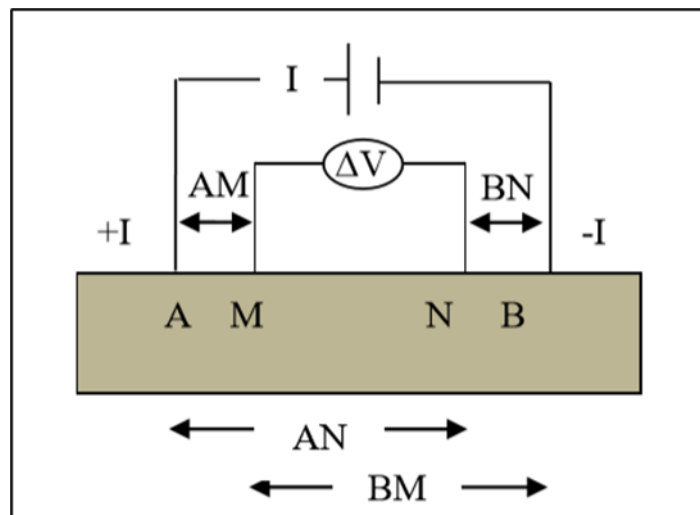


Figura 3.3. Arranjo simples, hipotético, de tomografia de resistividade elétrica (ERT), com quatro eletrodos, um par de corrente (A, B) e outro de potencial (M, N). No caso, a polaridade oposta entre os eletrodos A (positivo) e B (negativo), possibilita o cálculo da diferença de potencial elétrico (ΔV) existente entre os eletrodos M e N (Case, 2012).

A aquisição dos dados de resistividade aparente pode ser realizada por meio de diferentes técnicas, dentre as quais se destacam a sondagem elétrica vertical (SEV), a qual investiga variações verticais de resistividade em um ponto fixo, e o caminhamento elétrico, que opera com dados de resistividade nas escalas vertical e horizontal (Camarero, 2016). Existe ainda a perfilagem elétrica, realizada no interior de furos de sondagem. O presente trabalho utilizou da metodologia de caminhamento elétrico, sob a denominação de tomografia de resistividade elétrica, uma vez que objetiva a descrição do maciço de uma barragem em sua extensão lateral, assim como em profundidade.

3.2.1 FLUXO DE CORRENTE EM SUBSUPERFÍCIE

Conforme Dentith & Mudge (2014), a resistividade elétrica pode ser definida como o produto entre o fator geométrico de espaçamento, ou de correção (K), e a resistência (R), ou seja:

$$\rho = RK \quad (3.12)$$

O fator de correção é definido a partir da geometria do campo elétrico gerado, conforme mostra a relação a seguir:

$$K = \frac{\text{Área da seção transversal}}{\text{Comprimento}} \quad (3.13)$$

Combinando as equações acima e as substituindo na Lei de Ohm, temos:

$$V = \frac{\rho}{K} I \quad (3.14)$$

Para se determinar o potencial elétrico de um fluxo de corrente em ERT, recorre-se ao caso hipotético de um eletrodo de corrente isolado, em superfície, gerando um campo elétrico semiesférico em profundidade (Figura 3.4). O potencial (V) pode ser medido a uma distância (X) do eletrodo de corrente, assumindo-se que no infinito o potencial é nulo. O fator de correção (K), para este campo elétrico, será:

$$K = \frac{\text{Área da seção transversal}}{\text{Comprimento}} = \frac{2\pi X^2}{X} = 2\pi X \quad (3.15)$$

Substituindo o termo (K) na equação (3.13), a resistividade elétrica é definida como:

$$\rho = \frac{V}{I} (2\pi X) \quad (3.16)$$

O potencial elétrico a qualquer distância (X) do eletrodo de corrente será:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X}\right) \quad (3.17)$$

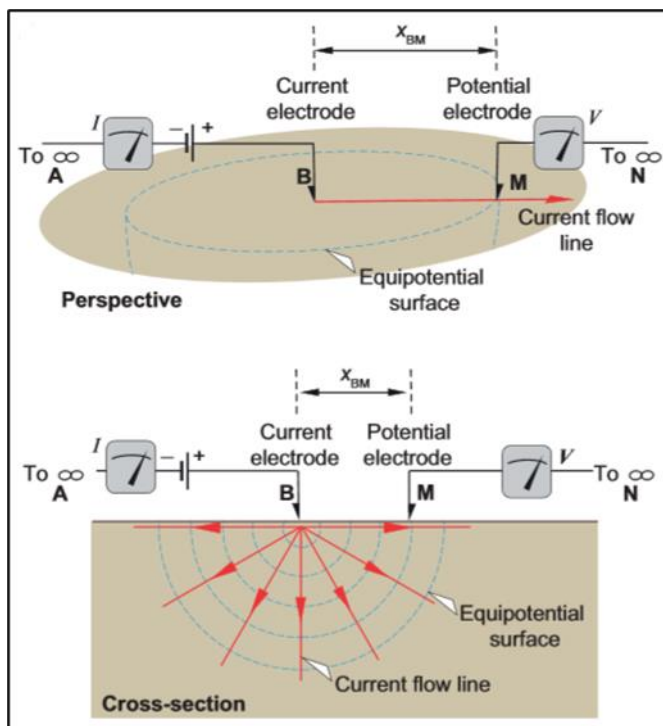


Figura 3.4. Eletrodos de corrente (A, B) e potencial (M, N), em superfície (figura superior) e o campo elétrico gerado em subsuperfície (figura inferior), com a disposição das linhas de fluxo de corrente (Dentith & Mudge, 2014).

Aplicando a relação obtida para o potencial elétrico no caso simplificado de um arranjo ERT com dois pares de eletrodos de corrente (A, B) e potencial (M, N), torna-se possível calcular a diferença de potencial resultante (ΔV), conforme mostra a relação a seguir. Para tanto, devem ser definidas as distancias entre eletrodos, ou seja, X_{AB} e X_{MN} (indicadas na Figura 3.4). O potencial resultante, em qualquer ponto, equivale a soma dos potenciais gerados pelos eletrodos de corrente, os quais apresentam polaridades opostas:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right) \quad (3.18)$$

Da mesma maneira, pode ser obtida a resistividade para cada eletrodo de corrente do arranjo utilizado:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right)^{-1} \quad (3.19)$$

O parâmetro de resistividade definido acima descreve um meio homogêneo, hipotético, em subsuperfície. O fator (K), que varia de arranjo para arranjo, neste caso, é representado pelo seguinte termo:

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{X_{AM}} - \frac{1}{X_{BM}} - \frac{1}{X_{AN}} + \frac{1}{X_{BN}} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

Na prática, em um meio geológico heterogêneo, as diferenças de resistividade entre os materiais, tendem a distorcer o campo elétrico gerado, o que produz uma diferença de potencial resultante diferente daquela esperada em um meio homogêneo. Portanto, em ensaios reais de eletrorresistividade o parâmetro aferido é a resistividade aparente (ρ_a). Por conseguinte, após o levantamento de campo, deve ser feita a conversão do conjunto de dados de resistividade aparente em resistividade real.

3.2.2 ARRANJO DOS ELETRODOS

Conforme mencionado, o cálculo da resistividade aparente em função da profundidade e posição na superfície, ocorre através de dois pares de eletrodos, cada qual responsável pela injeção de corrente e determinação da diferença de potencial. A disposição dos eletrodos na superfície é essencial, pois determina o fator de correção (K), utilizado no cálculo da resistividade aparente. As configurações de eletrodos mais utilizadas são: Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo (Sharma, 1997), sendo que cada um apresenta vantagens, desvantagens

e características específicas (resolução, sensibilidade e profundidade de penetração do sinal), a depender do objetivo do trabalho (Gandolfo, 2007).

A profundidade de alcance do sinal é controlada pelo comprimento máximo da linha de eletrodos. A resolução vertical e lateral estão condicionadas, respectivamente, ao tipo de arranjo e espaçamento entre os eletrodos. De maneira geral, o arranjo Wenner apresenta boa resolução vertical além de ser útil em condições ruidosas, apresentando maior intensidade de sinal na corrente de entrada. Contudo, é pouco eficaz na representação de anomalias com variação lateral, dada a sensibilidade horizontal limitada (Samouelian et al., 2005). O Schlumberger mostra boa relação entre a resolução vertical e horizontal. O Dipolo-Dipolo apresenta melhor resolução horizontal (lateral) que vertical, sendo mais eficiente em condições pouco ruidosas (Teixeira, 2013).

O arranjo Wenner (Figura 3.5a) os eletrodos de corrente (A, B) e potencial (M, N) são mantidos a uma mesma distância constante (a), sendo que os de potencial ficam na parte interna do arranjo (Case, 2012). Quanto maior for o espaçamento entre eles, maior é a profundidade de alcance do sinal. No Schlumberger (Figura 3.5b), também denominado Wenner-Schlumberger, os eletrodos de potencial também são posicionados dentro do arranjo, porém com espaçamento ($n \cdot a$) entre os eletrodos AM e BN e espaçamento (a) entre MN. O número relacionado a (n) deve ser um múltiplo de (a).

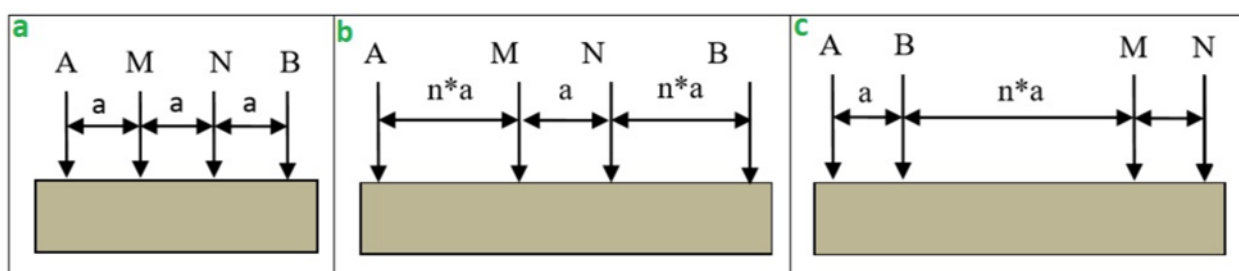


Figura 3.5. Arranjos de ERT, (a) Wenner, (b) Schlumberger, (c) Dipolo-Dipolo (Modificado de Case, 2012).

A configuração Dipolo-Dipolo (Figura 3.5c) difere das demais por isolar os pares de eletrodos AB e MN a uma distância de ($n \cdot a$). A distância relativa entre os eletrodos, em cada par, é (a).

Samouelian et al. (2005) categorizou os diferentes arranjos de acordo com a sensibilidade horizontal e vertical, profundidade de alcance do sinal, extensão lateral (horizontal) e intensidade do sinal (Tabela 3.1), de maneira comparativa, auxiliando na escolha da configuração ideal, com base nas vantagens e desvantagens de cada. Os números de 1 a 4 representam, respectivamente, condições menos a mais favoráveis do arranjo, com respeito ao parâmetro de interesse.

Tabela 3.1. Vantagens e desvantagens nos arranjos ERT (Samouelian et al., 2005)

	Wenner	Schlumberger	Dipolo-Dipolo
Sensibilidade Vertical	4	2	1
Sensibilidade Horizontal	1	2	4
Profundidade de Alcance	1	2	3
Extensão Lateral	1	2	3
Intensidade do Sinal	4	3	1

Os arranjos mencionados neste capítulo são voltados exclusivamente a aquisições 2D do meio em subsuperfície. Nestas são obtidas informações relativas à variação da resistividade nas escalas vertical e horizontal. A profundidade de investigação deduzida para um meio heterogêneo é denominada pseudoprodutividade e está associada ao espaçamento ($n \cdot a$) entre pares de eletrodos. Os modelos gráficos gerados remetem à pseudoseções de resistividade aparente.

Levantamentos unidimensionais são feitos por meio da sondagem elétrica vertical (SEV), na qual é observada a resposta da corrente induzida em profundidade, apenas. Existem, ainda, levantamentos 3D, cuja área de amostragem corresponde a um bloco tridimensional do alvo. Neste caso, é feita a interpolação e reconstrução de um conjunto de seções 2D (Chambers et al., 2002). Contudo, é necessário que as anomalias elétricas apresentem uma orientação, ou *trend*, preferencial e que as linhas de eletrodos sejam

posicionadas perpendicularmente a direção do *trend* (Samouelian et al., 2005). Alternativamente ao método da interpolação de seções, alguns autores (Habberjam & Watkins, 1967; Senos Matias, 2002) optam por realizar a aquisição em arranjos quadrupolares de eletrodos. A vantagem reside no fato da montagem dos eletrodos não depender da direção das anomalias elétricas, o que é de grande serventia na ausência de informações a priori.

3.2.3 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ERT

No caso hipotético de um solo homogêneo, com distribuição granulométrica uniforme, a resistividade calculada é constante e independente do espaçamento entre eletrodos. Na presença de heterogeneidades, a resistividade varia de acordo com a posição dos eletrodos e passa a ser denominada aparente, conforme já discutido. Esta, permite a determinação qualitativa de atributos elétricos do meio, porém não permitindo o cálculo da resistividade real e delimitação espacial e geométrica das anomalias (Meheni et al., 1996).

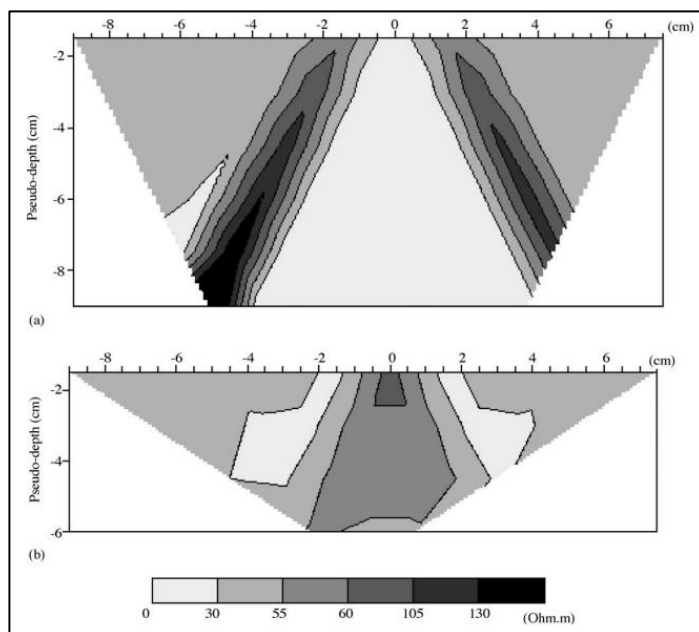


Figura 3.6. Pseudoseções de resistividade aparente exibindo um corpo resistor em um meio homogêneo, nas configurações de eletrodos (a) Dipolo-dipolo e; (b) Wenner (Samouelian et al., 2005).

A resistividade aparente é plotada junto a pseudopfundidade, em pseudoseções. A visualização e interpretação de variações de resistividade em profundidade, para um meio homogêneo, depende da escolha do arranjo de

eletrodos. No arranjo Dipolo-Dipolo, um corpo resistivo, com heterogeneidade vertical, apresenta o formato de V reverso, com valores altos de resistividade envolvendo valores baixos (Figura 3.6 a). No arranjo Wenner, conforme mostra a figura 3.6 b, a anomalia é representada pelo mesmo V reverso, porém com valores baixos envolvendo valores mais altos de resistividade (Samouelian et al., 2005).

A ambiguidade na interpretação de pseudoseções geradas sobre uma mesma área, a partir de arranjos distintos, é minimizada após o cálculo dos valores de resistividade real, este, obtido por meio do processo de inversão.

Dados quantitativos da distribuição de resistividade dependem da inversão dos dados de resistividade aparente em resistividade interpretada. Neste procedimento, os valores aferidos são atribuídos a profundidade efetiva, em detrimento da pseudopropriedade. A avaliação da profundidade efetiva, ou real, também está ligada ao arranjo utilizado e, em específico, aos parâmetros de espaçamento (n) e (a). A profundidade tende a aumentar proporcionalmente ao acréscimo do espaçamento (Samouelian et al., 2005).

No entanto, a profundidade efetiva também tem relação com o acamamento do material em profundidade. A presença de superfícies condutivas reduz a profundidade da investigação. A intercalação de camadas horizontais com diferentes resistividades resulta em deflexão da corrente elétrica em profundidade (Kearey et al., 2002). Regiões de interface entre camadas tendem a amenizar ou atenuar o sinal, o que é facilmente observado em curvas de resistividade aparente, nas quais o parâmetro é plotado em função do espaçamento de eletrodos (a), conforme ilustra o caso teórico da Figura 3.7.

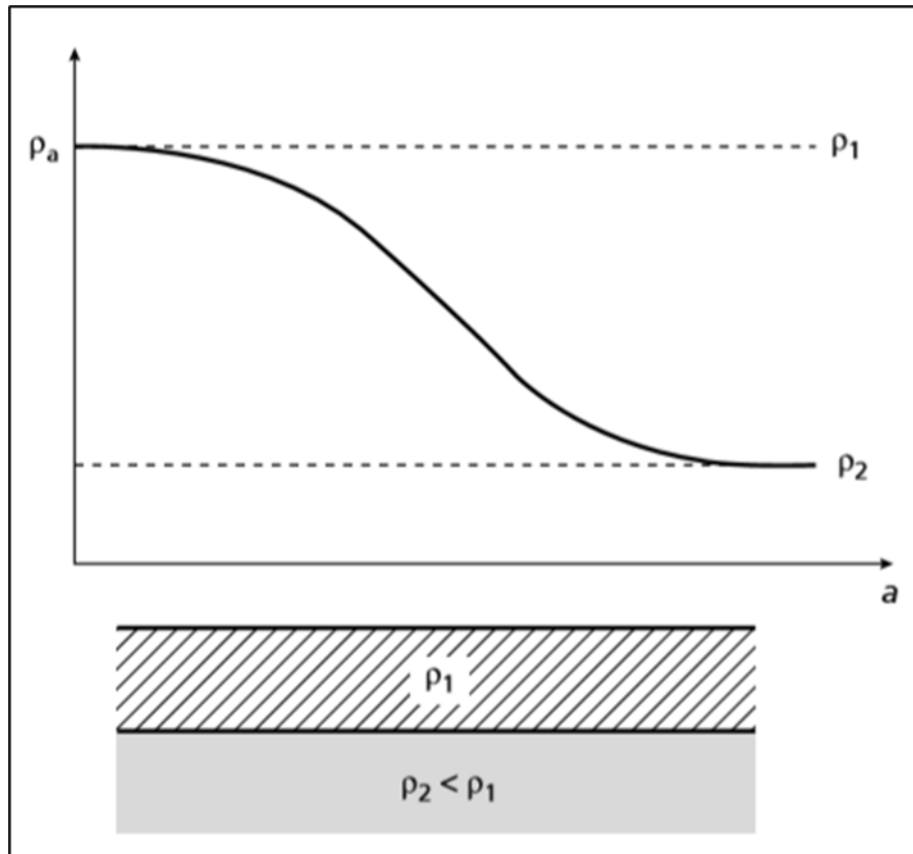


Figura 3.7. Curva de resistividade aparente para um meio heterogêneo de duas camadas horizontais, sendo a superior mais resistiva (Kearey et al., 2002).

3.3 Polarização Induzida

O método de polarização induzida (IP) se fundamenta na capacidade de polarização dos materiais geológicos, o que pode ser verificado através de um experimento simples. Em um arranjo ERT convencional, com dois pares de eletrodos (transmissor e receptor), uma corrente é induzida no solo. A diferença de potencial é, então, medida por meio dos eletrodos de potencial. Após alguns instantes a corrente é abruptamente interrompida. A voltagem estabelecida entre os eletrodos de potencial não cairá para zero imediatamente. Após um importante decréscimo inicial, o potencial passa a decair gradualmente, até que, segundos depois, torna-se nulo (Kearey et al., 2002).

O mesmo padrão é observado quando a corrente é estabelecida. Após um período inicial de rápido acréscimo de potencial, o aumento ocorre de forma gradativa, até que se chegue no valor máximo, estacionário (Telford, 1990).

As partículas constituintes do solo, no caso apresentado, comportam-se como capacitores, armazenando carga ou polarização. O método é particularmente útil em materiais que apresentam, em sua constituição, minerais condutores ou semicondutores, como sulfetos, óxidos, metais nativos, grafita e argilominerais disseminados na matriz (Kemna et al., 2012).

Em levantamentos de IP é usada uma corrente AC ou DC variável de baixa frequência, sendo esta, uma diferença essencial em relação ao método ERT, o qual se basta de uma corrente DC constante (Dentith & Mudge, 2014). Quanto maior a frequência da corrente, menor é o valor aferido de resistividade aparente. Isso ocorre devido a capacitância do solo, que inibe a passagem de correntes diretas, porém aumenta a eficiência na transmissão de correntes alternadas, proporcionalmente ao aumento da frequência.

O atraso na resposta de voltagem nos materiais geológicos, devido à capacitância, é caracterizado pela curva de relaxação ou transiente, que constitui a base do método IP (Moura & Filho, 2003). As aquisições são realizadas segundo dois métodos distintos, no domínio do tempo ou da frequência. No primeiro caso, é calculado o decaimento da diferença de potencial para um determinado intervalo de tempo. No segundo, é medida a resistividade aparente a partir de duas ou mais correntes AC de baixa frequência (Kearey et al., 2002).

3.3.1 AQUISIÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA

Segundo Kearey et al., (2002), as aquisições no **domínio do tempo** envolvem o decaimento da voltagem após a interrupção da corrente elétrica. O parâmetro determinado, no caso, é denominado cargabilidade (M), definido como a área sobre a curva de relaxação (Figura 3.8) para um determinado intervalo de tempo ($t_1 - t_2$). A grandeza deve ser normalizada segundo a diferença de potencial total (ΔV_C). Vale ressaltar que cada fase mineral apresenta

um intervalo específico de cargabilidade e que, quanto mais longa for a curva de decaimento, mais polarizável é o material (Dentith & Mudge, 2014).

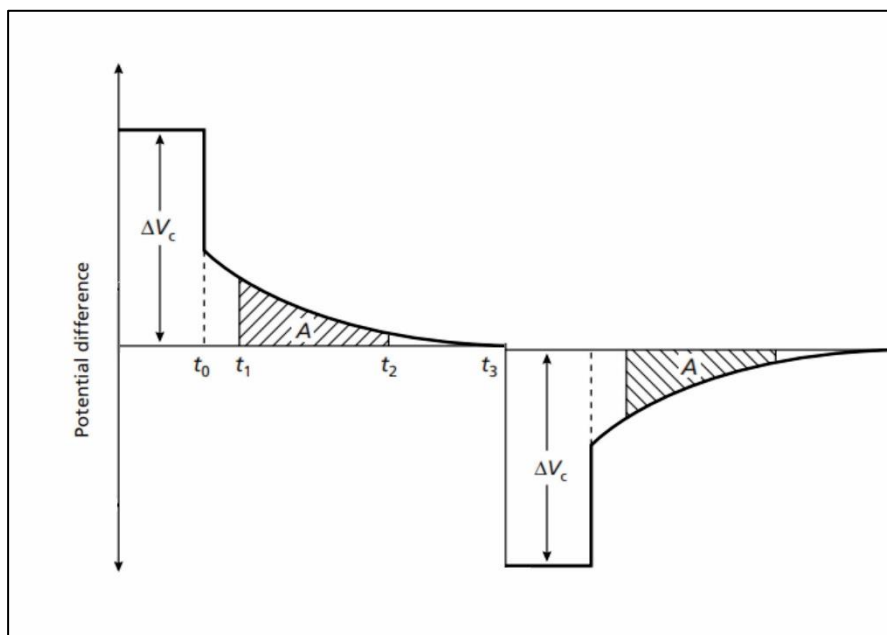


Figura 3.8. Curva de relaxação ou transiente hipotética em aquisição IP, domínio do tempo. É possível observar um rápido decréscimo de voltagem no tempo t_0 , quando interrompida a corrente. A partir de então, o decaimento de potencial é gradual até que se torne nulo. A cargabilidade é representada pela área (A) contida no intervalo de tempo t_1-t_2 . A diferença de potencial resultante (ΔV_c), entre a interrupção da corrente e o momento da descarga, no tempo t_3 , é utilizada como constante de normalização no cálculo da cargabilidade (Kearey et al., 2002).

A equação a seguir descreve a cargabilidade por meio de uma integral simples, em analogia à área sobre a curva de transiente:

$$M = \frac{A}{\Delta V_c} = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (3.24)$$

No **domínio da frequência**, a variação da resistividade aparente de correntes AC com diferentes frequências, transmitidas no meio geológico, são utilizadas na quantificação da polarização. O espectro de frequências compreendido varia de 0,01 a 1000 Hz. O método descrito é conhecido como IP espectral ou resistividade complexa, tendo larga aplicabilidade na prospecção

de sulfetos e óxidos em diversos tipos de depósito mineral (Dentith & Mudge, 2014), embora pouco usado em estudos geofísicos aplicados a geotecnia.

Em grande parte das aquisições deste tipo, a corrente alternada é transmitida na forma de ondas de baixa frequência, da ordem de 0,1 a 3 Hz. São realizadas amostragens em duas frequências, sendo que a maior equivale ao triplo da menor. Assume-se que a resistividade aparente do meio em subsuperfície equivale à menor frequência (Dentith & Mudge, 2014).

A diferença de resistividade ($\rho_{\min} - \rho_{\max}$) entre ambas as frequências é útil na determinação de um parâmetro específico da polarização induzida, o efeito da porcentagem de frequência (EPF):

$$EPF(\%) = \frac{\rho_{\min} - \rho_{\max}}{\rho_{\max}} 100 \quad (3.25)$$

Outro parâmetro relacionado ao IP no domínio da frequência é o Fator de Metal (FM), que equivale a razão entre o EPF e a resistividade aferida na menor frequência. O nome da grandeza deriva do fato desta ser utilizada na determinação de regiões com concentrações anômalas de metais, em terrenos altamente condutivos.

No domínio do tempo e da frequência, uma maneira comum de se apresentar os dados de IP é por meio das pseudoseções, de maneira similar ao ERT, uma vez que as leituras são plotadas junto a profundidade. Ademais, os equipamentos utilizados no momento da aquisição, assim como o conjunto de arranjos disponíveis (Dipolo-Dipolo, Schlumberger, Polo-Dipolo, dentre outros), se assemelham muito aos do método ERT, embora a corrente transmitida pelo método IP seja, em média, 10 vezes maior (Kearey et al., 2002). O espaçamento entre eletrodos, em geral dotado, varia de 3 a 300 metros, a depender do objetivo do levantamento.

O capítulo de aquisição de dados geofísicos descreve, em detalhes, o arranjo de eletrodos, equipamentos, parametrização e demais procedimentos utilizados nos levantamentos de IP e ERT na área de estudo.

3.3.2 MECANISMOS DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA

Quando uma diferença de potencial é estabelecida em materiais terrestres, estes tendem a se comportar como capacitores, concentrando cargas de polaridade opostas em regiões distintas. Quando o potencial é removido, ocorre a descarga do capacitor e as cargas polarizadas tendem a migrar por dentro o meio, guiando-se de acordo com diferenças de resistividade/condutividade no meio. Este movimento de cargas tende a induzir novas diferenças de potencial, secundárias, no material e estas, por sua vez, decaem com o dispersar da corrente (Dentith & Mudge, 2014). As aquisições de IP buscam quantificar o decaimento desta voltagem.

Na literatura, são apresentados dois mecanismos de polarização em meios naturais, a polarização de membrana (ou eletrolítica) e polarização de eletrodo (Telford, 1990).

A **polarização de membrana** descreve a passagem de corrente em um meio poroso saturado em fluido ou preenchido por argilominerais, a partir de processos eletrolíticos. A matéria orgânica e partículas minerais presentes no solo, em especial na fração argila, tendem a adsorver íons em sua superfície externa, além de promover a dispersão de colóides (Weber et al., 2005). No caso dos argilominerais, que pertencem a classe dos filossilicatos e apresentam estrutura placóide, as cargas são assimiladas por substituição iônica (cargas permanentes ou estruturais) ou associação de prótons (H^+) e adsorção específica de cátions/ânions (cargas variáveis).

Em um meio poroso, a região de interface entre a matriz mineral e o fluido apresenta uma concentração elevada de partículas negativamente carregadas. Os cátions presentes na fase fluida são, então, atraídos em direção à parede dos poros, gerando uma membrana de íons (Milsom, 2003). Se um campo elétrico é aplicado no solo, ocorre polarização e, portanto, segregação entre cargas positivas e negativas. Em regiões de constricção, nas quais ocorre estreitamento do diâmetro dos poros, forma-se uma barreira eletrolítica, pois as cargas concentram-se em lados opostos da porção mais estreita, de maneira a bloquear o fluxo de corrente elétrica (Kearey et al., 2002), conforme ilustra a Figura 3.9.

Quando o campo elétrico é removido, as cargas retornam a sua posição inicial, após um intervalo de tempo finito (Telford, 1990).

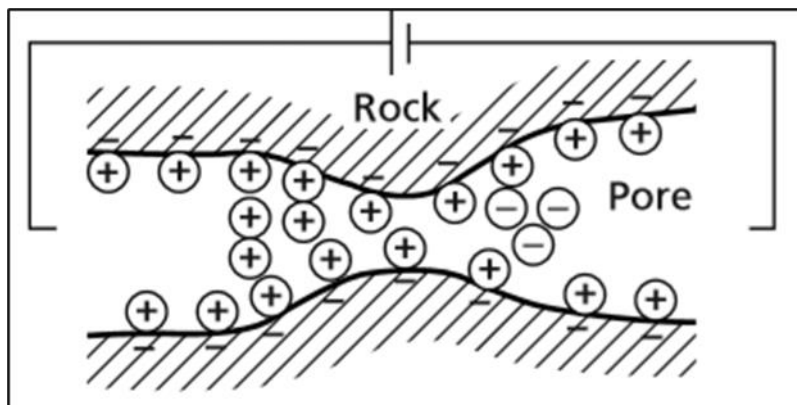


Figura 3.9. Modelo ilustrativo do fenômeno de polarização de membrana. As cargas positivas tendem a aderir no contato entre o fluido e a matriz, devido à concentração de ânions nas fases minerais. Após estabelecida uma diferença de potencial, ocorre polarização do material nas zonas de constrição, onde ocorre estreitamento dos poros (Kearey et al., 2002).

O fenômeno é frequente em materiais argilosos, pois além da elevada disponibilidade de íons, o diâmetro dos poros é bastante reduzido e a superfície de contato grande, o que favorece a polarização. A magnitude da polarização, contudo, não cresce de maneira constante conforme maior o conteúdo de argila no solo, havendo, até mesmo, uma queda em intensidade após alcançado o valor máximo (que ocorre para concentrações próximas a 10% da matriz). Isso se deve ao fato de a polarização de membrana depender da intercalação de poros largos e estreitos, o que não ocorre se a granulometria for muito fina (Telford, 1990). Fatores como a salinidade do fluido e a presença de argilominerais de estrutura simples, do tipo 1:1 (grupo da caolinita), favorecem a polarização.

O mecanismo de **polarização de eletrodo** também ocorre em meio poroso, nas zonas de constrição, sendo essencial, no entanto, que grãos minerais estejam obstruindo as seções mais estreitas nos poros. Se o grão for um mineral mais condutivo, um metal, por exemplo, o fluxo de corrente será favorecido e se dará por condução eletrônica.

Se induzido um campo elétrico no espaço poroso, as cargas positivas e negativas se concentram em lados opostos do grão metálico, o que reflete a

propensão do meio de perda ou ganho de elétrons para o grão. Contudo, este processo eletrônico é muito lento e, portanto, não impede o acúmulo de cargas nos poros, o que é essencial para que ocorra polarização (Figura 3.10). Quando o campo elétrico é interrompido, as cargas retornam às posições iniciais, ocasionando o decaimento da voltagem (Kearey et al., 2002).

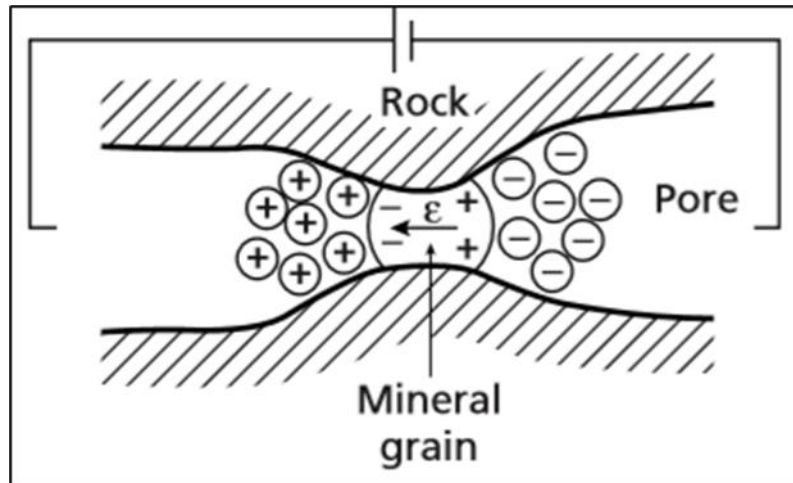


Figura 3.10. Modelo ilustrativo do fenômeno de polarização de eletrodo, no qual a condução é eletrônica e ocorre através de um grão mineral condutor, obstruindo uma zona de constricção de poro. Quando estabelecida uma diferença de potencial, as cargas de sinal oposto concentram-se em cada lado do grão, gerando a polarização induzida (Kearey et al., 2002).

A condução de corrente através de grãos condutores pode ocorrer simultaneamente a condução eletrolítica se os vazios forem preenchidos por fases minerais disseminadas e condutoras, como também por uma fase fluida salina. Neste caso, a polarização ainda é de eletrodo, já que não se estabelece uma barreira eletroquímica (Telford, 1990).

3.4 Ground Penetrating Radar (GPR)

3.4.1 INTRODUÇÃO

O Radar de Penetração do Solo ou *Ground Penetrating Radar* (GPR), consiste em um método geofísico eletromagnético que utiliza da propagação de ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência (10 MHz – 2,500 GHz) em subsuperfície (de Souza, 2006). Devido à faixa de frequências utilizada, a

penetração do sinal limita-se a profundidades rasas abaixo da superfície. A resposta a propagação dos pulsos eletromagnéticos, contudo, apresenta alta resolução (Xu et al., 2010).

No GPR, o campo eletromagnético se propaga na forma de ondas não dispersivas. O método opera de forma análoga à sísmica, utilizando do princípio da reflexão/refração de ondas e porque o sinal captado na antena receptora se assemelha ao sinal transmitido (Annan, 2005).

A geração e captação de ondas depende da utilização de uma antena transmissora, responsável por gerar o pulso EM que irá refletir ou sofrer espalhamento ao interagir com o meio, e uma antena receptora, que armazena a energia refletida/espalhada captada em superfície (Teixeira, 2013). O registro da energia ocorre em função do tempo duplo (tempo de ida e volta), ou seja, relativo ao trânsito entre a antena transmissora e a superfície ou descontinuidade refletora (tempo de ida), somado ao tempo de retorno a superfície (tempo de volta).

O fenômeno da reflexão ocorre na interface entre dois meios, quando o ângulo de incidência da onda EM é igual ao de reflexão. Por outro lado, a refração ocorre no caso em que a onda eletromagnética se propaga entre meios de diferentes densidades (Figura 3.11) ou, no caso, diferentes constantes dielétricas, segundo a lei de Snell, dada pelas relações:

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.26)$$

$$K_1 \cdot \text{Sen}\theta_1 = K_2 \cdot \text{Sen}\theta_2 \quad (3.27)$$

Sendo,

Θ_1 = Ângulo de reflexão (igual ao de incidência)

Θ_2 = Ângulo de refração

V_1 = Velocidade de propagação no meio 1

V_2 = Velocidade de propagação no meio 2

K_1 = Constante dielétrica do meio 1

K_2 = Constante dielétrica do meio 2

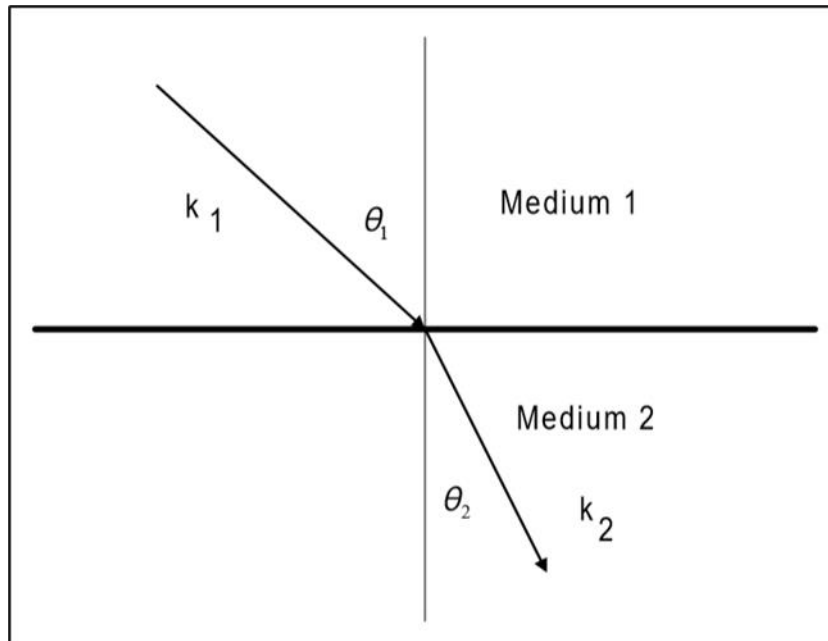


Figura 3.11. Exemplo esquemático da lei de Snell, ilustrando dois meios com propriedades eletromagnéticas distintas. No caso, ocorre modificação na velocidade da onda ao transitar na região de interface entre ambos (Annan, 2001).

O espalhamento envolve os casos em que a energia EM incidente, ao interagir com a região de interface entre dois materiais, sofre um desvio cujo ângulo é imprevisível. O que determina o tipo de espalhamento é a relação entre o tamanho médio das partículas que compõe o meio e o comprimento de onda da radiação EM.

Nos estudos de GPR o comportamento mais utilizado é a reflexão espectral. Nesta, haverá reflexão de parte da radiação EM, na zona de interface entre dois meios, enquanto a outra parte será refratada segundo o ângulo crítico, passando a se propagar paralelamente a interface. Ademais, parte desta energia será transmitida entre os meios, podendo interagir (refletir ou refratar) com um terceiro meio em subsuperfície (Figura 3.12). Neste caso, em que ocorrem várias interfaces, os dados de GPR irão indicar sucessivas reflexões em diferentes intervalos de profundidade (Baker, 2013).

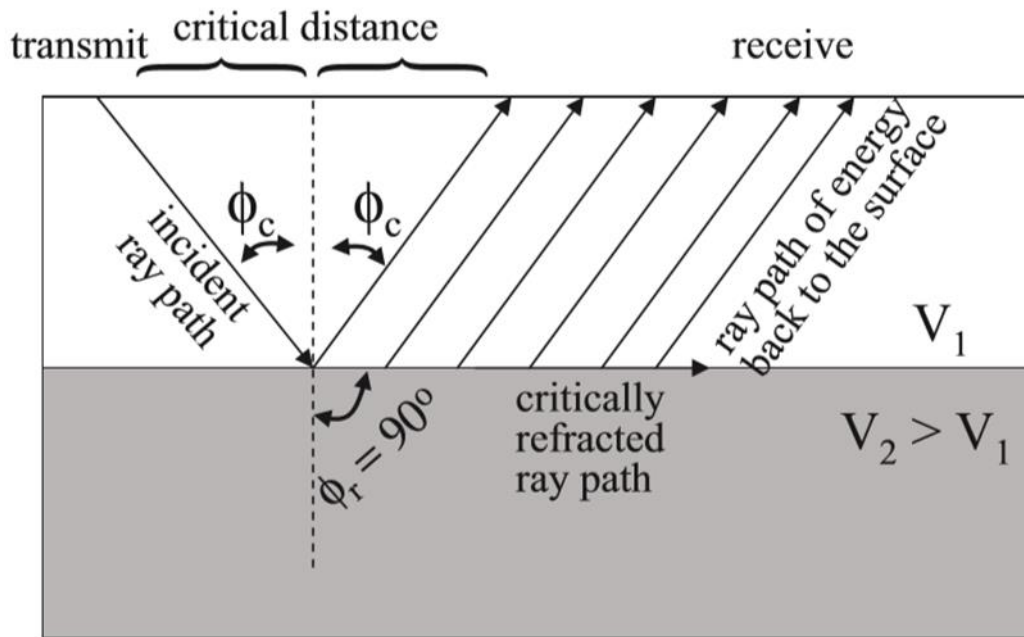


Figura 3.12. Diagrama ilustrando o comportamento de um pulso EM na região de interface entre meios com velocidades diferentes. No caso, a reflexão ocorre com ângulo igual ao de incidência e a refração segundo o ângulo crítico. Nesta, os raios se propagam paralelamente a superfície (Baker et al., 2007).

O comportamento do pulso propagado é influenciado pelas propriedades elétricas do meio, a exemplo da permissividade elétrica relativa (ϵ) ou constante dielétrica (κ), parâmetro, este, discutido mais à frente. A variação deste parâmetro ocorre, essencialmente, na transição entre materiais geológicos distintos, de maneira a afetar a velocidade e o curso da onda eletromagnética (de Souza, 2006). A intensidade e atenuação do sinal são controlados pelo contraste de condutividade elétrica e permeabilidade magnética (capacidade do material de adquirir magnetização quando submetido a um campo eletromagnético) entre meios. Quanto maior a permeabilidade, maior será a atenuação do sinal GPR e, portanto, menor será a resolução do dado obtido e menor a profundidade alcançada. Da mesma forma, a atenuação ocorre na presença da água e outros materiais condutivos (Baker et al., 2007).

3.4.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS

A propagação de ondas eletromagnéticas é quantitativamente bem descrita pelas equações de Maxwell, que compõe a base do eletromagnetismo. Nelas, são considerados o vetor de intensidade do campo elétrico (E), vetor de densidade do fluxo magnético (B), vetor de deslocamento elétrico (D), a intensidade do campo magnético (H), densidade de carga elétrica (q) e o vetor de densidade da corrente elétrica (J), conforme expressam as relações a seguir:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.28)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.29)$$

$$\nabla \cdot D = q \quad (3.30)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.31)$$

As equações descrevem, respectivamente, as leis de Faraday, Ampère, Coulomb e Gauss que, unificadas, demonstram como a indução de correntes elétricas tende a gerar campos eletromagnéticos. Em geral, a propagação de ondas EM, que constitui base para as análises de GPR, tem seu comportamento fundamentado nas leis de Maxwell (Baker et al., 2013).

É também necessário, no entanto, compreender bem o comportamento elétrico dos materiais quando submetidos a campos magnéticos. As equações a seguir provêm uma descrição macroscópica de como elétrons, átomos e moléculas respondem à aplicação de um campo (Annan, 2001), além de fornecer um vínculo com as relações constitutivas do eletromagnetismo. Para tanto, considera-se a condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ):

$$J = \sigma E \quad (3.32)$$

$$D = \epsilon E \quad (3.33)$$

$$B = \mu H \quad (3.34)$$

A condutividade elétrica descreve o movimento de cargas livres na presença de um campo elétrico externo (E), o que caracteriza uma corrente elétrica, cuja densidade é representada por (J). Em outras palavras, o parâmetro permite avaliar a facilidade com a qual uma corrente se propaga no interior do

material ou meio. A permeabilidade magnética (μ) permite quantificar o grau de magnetização de um material em resposta a aplicação de um campo magnético, também representando a facilidade com a qual o fluxo magnético é conduzido.

Em quase todas as aplicações de GPR, as grandezas tensoriais σ , ϵ e μ são tratadas como escalares que independem da intensidade do campo magnético (Annan, 2001). Tais propriedades podem estar associadas a alterações do campo incidente no domínio do tempo, de maneira que a densidade de corrente elétrica pode ser representada na forma:

$$J(t) = \int_0^{\infty} \sigma(\beta)E(t - \beta)d\beta \quad (3.35)$$

A equação acima é mais usada nos casos em que as propriedades intrínsecas são dispersivas. Em GPR, é também essencial definir a permissividade relativa (k), também denominada constante dielétrica, representada pela razão entre as permissividades do condutor (ϵ) e do vácuo (ϵ_0):

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.36)$$

Onde a permissividade do vácuo equivale a $8,89 \times 10^{-12}$ F/m.

O conceito de permissividade elétrica (ϵ) é aplicado aos materiais dielétricos que, além de se comportarem como isolantes, armazenando energia em resposta a um campo elétrico externo, compõe importante parte dos materiais geológicos (Baker et al., 2007). A permissividade representa a capacidade do material de adquirir polarização e armazenar energia, através do rearranjo de cargas, quando submetido a um campo eletromagnético externo. A grandeza é dimensionada em Faradays por metro (F/m).

A permissividade relativa ou constante dielétrica (k), por sua vez, é um parâmetro crítico utilizado em GPR responsável pelo controle da velocidade de propagação e comprimento de onda do sinal, sendo, portanto, imprescindível na determinação da resolução (Baker et al., 2007).

3.4.3 TÉCNICAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Existem três técnicas diferentes para a aquisição de dados GPR, o *Common Midpoint* (CMP), *Common Offset* (CO) e a Transluminância, também denominada tomografia de radar.

O **Common Midpoint** (CMP) ou *wide angle reflection and refraction* (WARR) é o método EM equivalente a sísmica de refração e de reflexão de ângulo amplo, cujo principal objetivo é a obtenção da velocidade do sinal eletromagnético em função da profundidade. A aplicação do CMP consiste em aumentar o espaçamento relativo entre as antenas transmissora e receptora, gradativamente, em torno de um ponto fixo central, ou seja, o ponto médio (Figura 3.13). A mudança no tempo duplo, de ida e volta do pulso eletromagnético, deve ser registrada para cada espaçamento relativo (Jol, 2009).

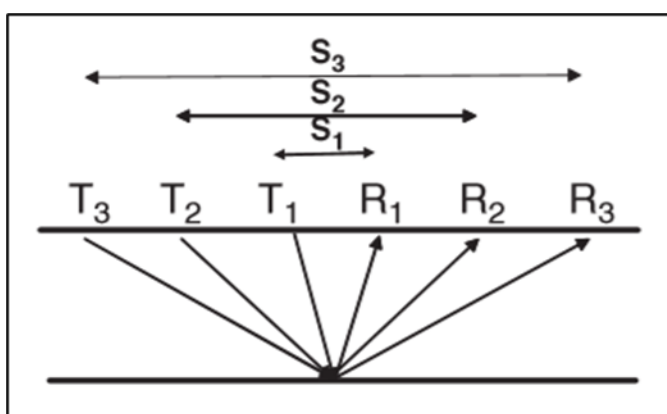


Figura 3.13. Diagrama esquemático da técnica de CMP, na qual o espaçamento (S) entre a antena transmissora (T) e receptora (R) é gradualmente estendido, em torno de um ponto médio fixo (Jol, 2009).

A velocidade da onda EM é calculada a partir da curva de reflexão da onda direta, com respeito aos parâmetros de espaçamento entre as antenas e tempo duplo de percurso. Tal estimativa é muito útil na determinação da profundidade de um refletor (Baker et al., 2007).

No **Common Offset** (CO) ou reflexão com afastamento constante é a técnica de aquisição mais utilizada. Nesta, o afastamento entre as antenas transmissora e receptora é constante e o arranjo deve ser transportado, ao longo de um perfil retilíneo, com auxílio de uma unidade móvel. Os intervalos de amostragem (Δx) são regulares e a orientação das antenas é fixa (Figura 3.14). O objetivo é, no caso, mapear a refletividade do meio em subsuperfície em função da posição horizontal. As variações observadas em amplitude de reflexão

e tempo de atraso do sinal, indicam mudanças de velocidade, atenuação e impedância (Jol, 2009).

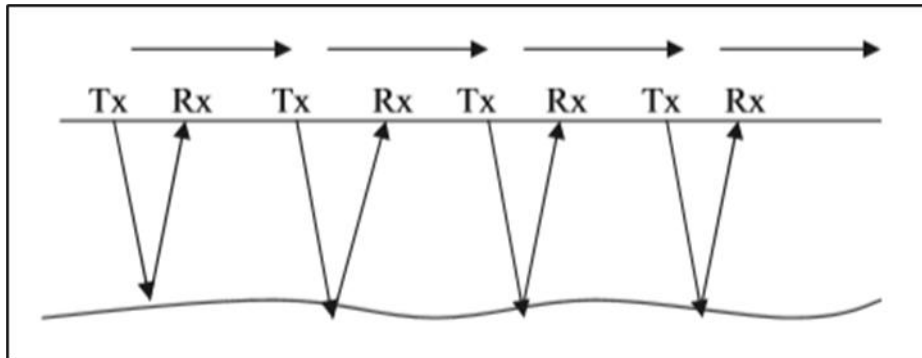


Figura 3.14. Diagrama esquemático da técnica de CO, na qual o espaçamento entre as antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx) é mantido constante, assim como o intervalo de amostragem e a orientação das antenas (Baker et al., 2007).

Este tipo de levantamento depende de alguns parâmetros, que devem ser definidos anteriormente à sua realização, tais quais a frequência central, tempo de duração da aquisição, intervalo de tempo de amostragem, espaçamento entre estações de amostragem, espaçamento entre antenas, orientação das antenas e espaçamento de separação entre linhas, caso sejam realizados dois ou mais perfis (Jol, 2009).

Por fim, a técnica de **Transuminação** ou tomografia de radar é uma aquisição de GPR realizada em furos de sondagem, sendo necessários dois poços. A antena transmissora é colocada em um destes, enquanto a receptora ocupa o outro. Deve-se, então, mover as antenas, a partir de incrementos regulares, de forma a mapear feições nas seções verticais (Baker et al., 2007). O cálculo da velocidade e atenuação derivam, no caso, do tempo de trânsito do sinal e amplitude da onda transmitida (Jol, 2009).

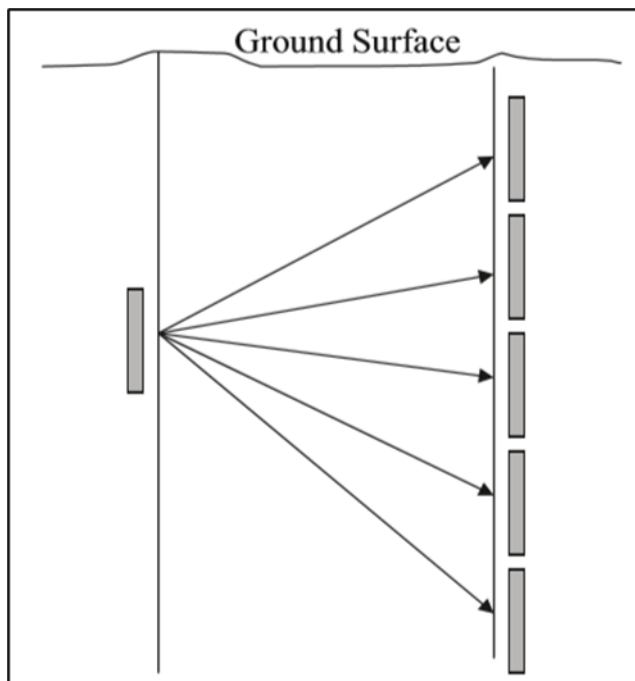


Figura 3.15. Diagrama esquemático da técnica de Transluminância, na qual as antenas são inseridas em furos de sondagem e então deslocadas em incrementos regulares, o que resulta no mapeamento do meio em seções verticais (Baker et al., 2007).

Alguns parâmetros adicionais devem ser considerados, como o diâmetro dos furos de sondagem e o espaçamento relativo entre eles. A orientação da antena deve ser mantida fixa, de forma a evitar que valores falsos de velocidade e atenuação sejam registrados. Outro detalhe essencial, é realizar a movimentação relativa entre as antenas de maneira sincrônica (Jol, 2009).

4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS E GEOLÓGICAS DO SÍTIO DA BARRAGEM

4.1 Descrição Geotécnica da Barragem

A barragem de interesse (Figura 4.1) foi construída no início da década de 1960 e se interpõe ao leito do alto curso de um pequeno rio em um trecho da Serra do Mar (RJ), a cerca de 500 m de sua nascente, que corresponde a confluência de dois rios maiores. O reservatório, destinado ao acúmulo e armazenamento de água para fins industriais, apresenta aproximadamente 6 milhões de m³. A barragem é de terra compactada e possui seção homogênea, além de proteção de enrocamento (*rip-rap*) a montante. Seu comprimento ao longo da crista (coroamento) é de 140 m e altura máxima sobre a fundação é de 38 m.

O nível de água máximo é de $5,3 \times 10^6 \text{ m}^3$, na cota altimétrica de 78,75 m a montante. Para tal valor, caso não houvesse perda de água via percolação, ombreiras e fundação, a vazão seria de 520 L/s.

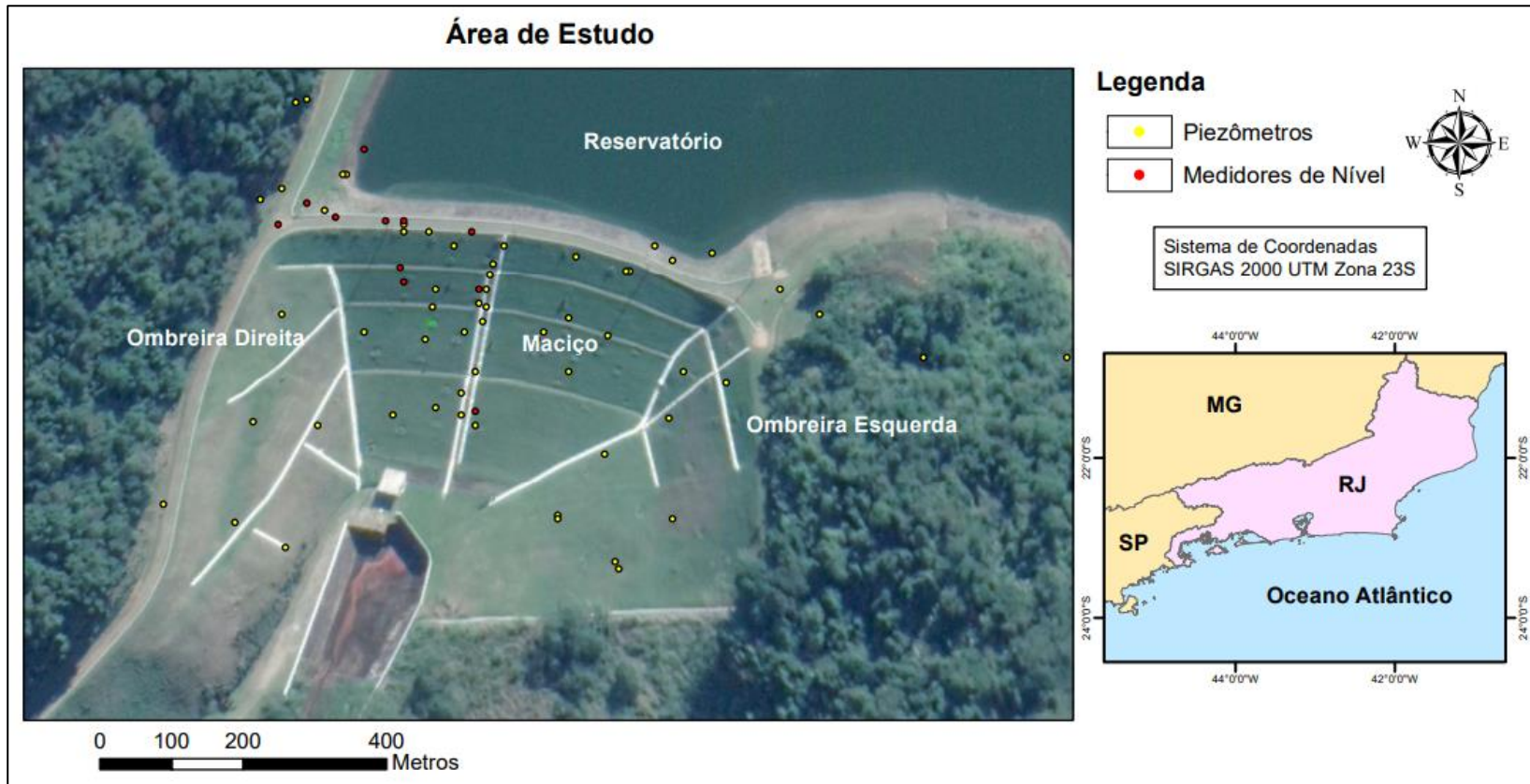


Figura 4.1. Planta da barragem de interesse, apresentando o posicionamento dos piezômetros (em amarelo) e medidores de nível d'água (em vermelho), além dos principais elementos constituintes da estrutura, tais quais, maciço central, ombreiras e reservatório.

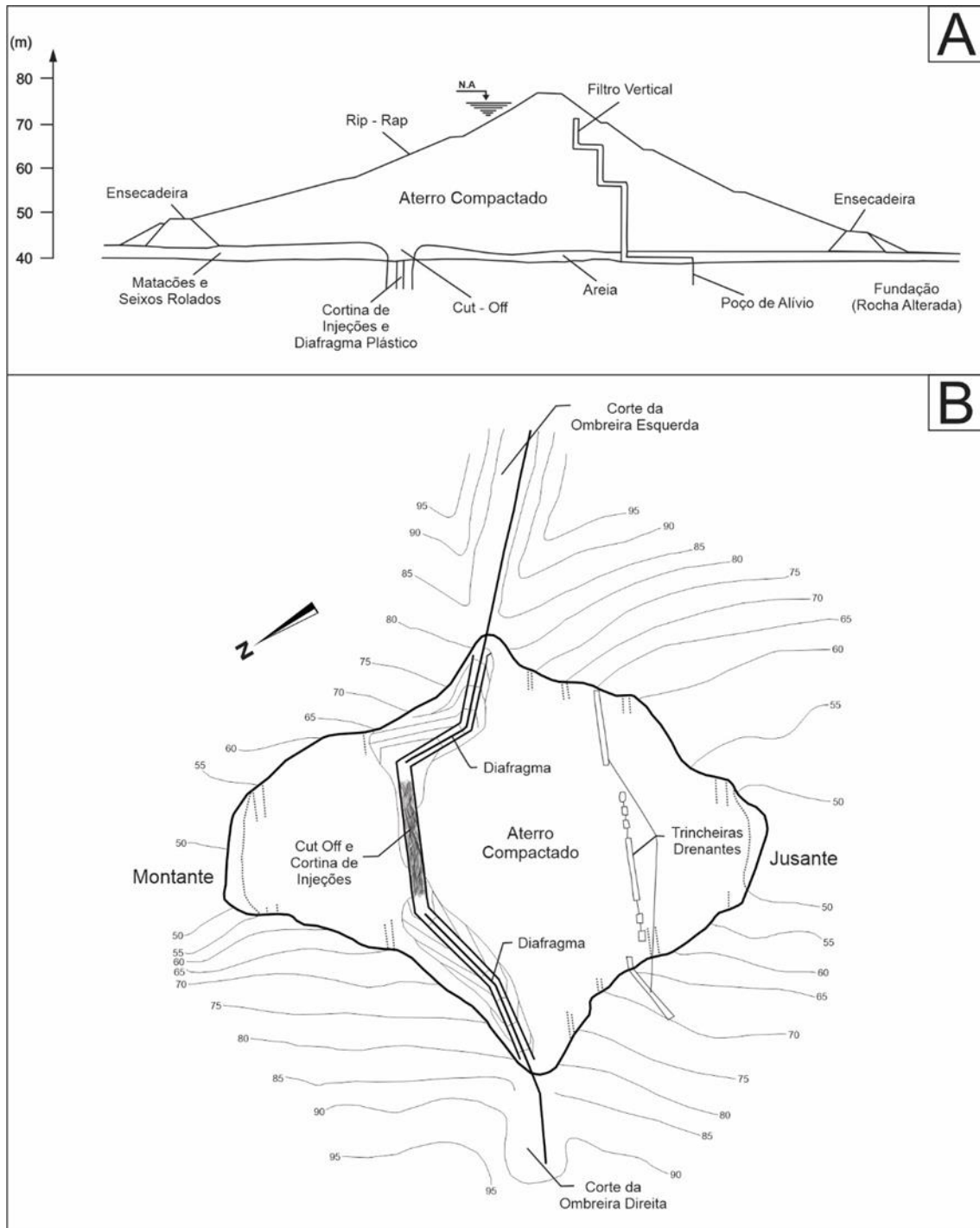


Figura 4.2. (A) Seção esquemática simples de direção N185, transversal ao coroamento da barragem e corte ajustado a posição média do maciço (posição central da estrutura). Nesta, são representados os parâmetros de montante (submerso) e jusante, além de algumas estruturas internas e de fundação fundamentais; (B) Planta simplificada representando a região do aterro compactado e cercanias, com destaque a alguns elementos de fundação (cortina de injeções, diafragma e trincheiras drenantes), além de cortes de ombreira e curvas de nível.

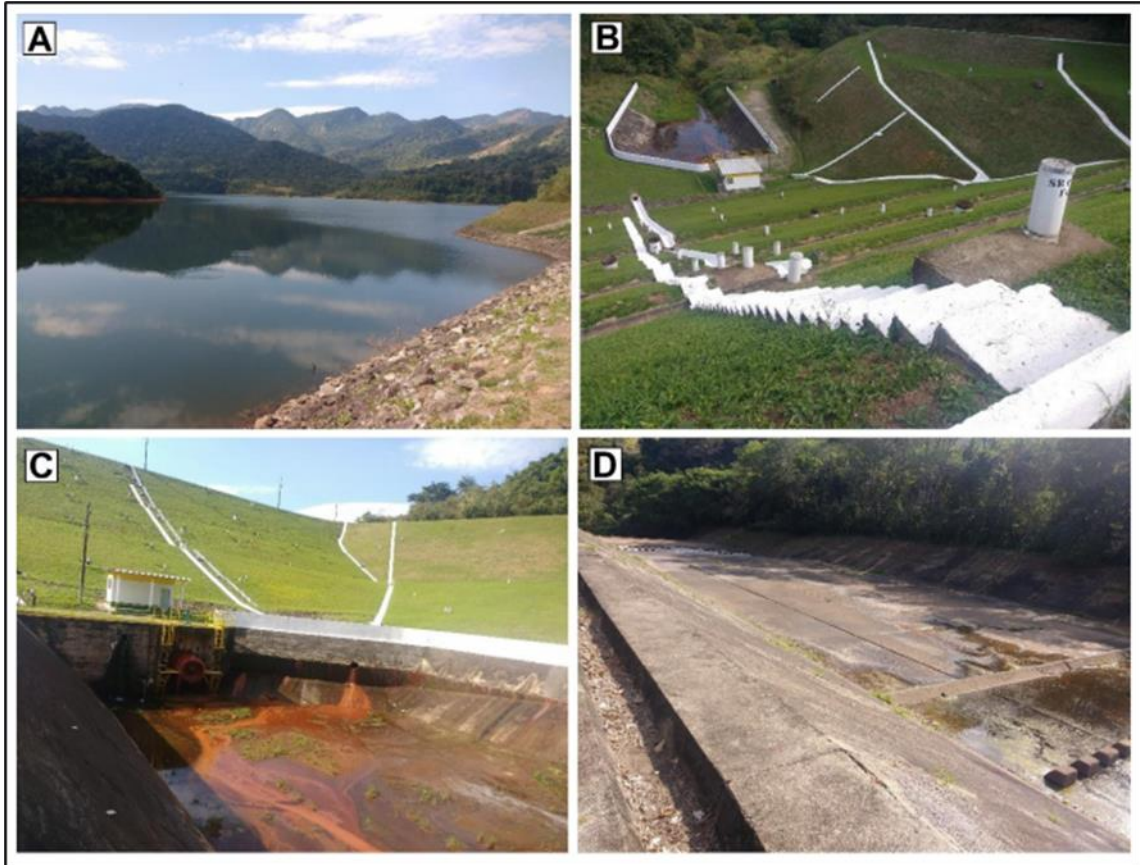


Figura 4.3. (a) Vista do topo da barragem com face para a represa; (b) parâmetro de jusante, dispondo de uma série de piezômetros e medidores de nível posicionados sobre os patamares do dique frontal; (c) barragem vista de sua base. O duto situado abaixo da estrutura permite a drenagem e eliminação de água e sólidos, em caso de saturação dos filtros; (d) vertedouro da represa. A estrutura de concreto está situada a norte da barragem de terra e permite a descarga do excesso de água, em períodos de intensa precipitação, a jusante do rio.

O aterro (Figura 4.3) apresenta volume de 180.000 m³ e trincheira de vedação de argila compacta na fundação, sob o parâmetro de montante. Esta possui profundidade de 10 m na porção central do talvegue, atingindo o topo da rocha alterada. Em direção às ombreiras, esta profundidade diminui gradativamente até atingir cerca de 1 m, próximo ao coroamento da barragem. A fundação apresenta tratamento com injeção de cimento na região correspondente ao leito do rio e várzea aluvionar, com profundidade de até 15 m, chegando à rocha praticamente sã. No capítulo estão ilustrados o perfil simplificado correspondente a um corte transversal ao coroamento da barragem, em sua posição intermediária e direção N185 (Figura 4.2A) e a planta sobre a fundação, dispondo das estruturas fundamentais e secundárias do maciço, representada junto às curvas de nível (Figura 4.2B).

Anos após a conclusão da obra, diafragmas plásticos foram instalados sob a barragem, de forma a reforçar a estanqueidade da fundação, até então realizada através do tratamento com calda de cimento e trincheiras de vedação. Para tanto, o nível do reservatório teve de ser rebaixado e o curso d'água desviado com o auxílio de ensecadeiras. Posteriormente, para que o diafragma fosse posicionado corretamente na região do *cut off*, parte do aterro teve de ser removido e, então, reconstruído. A adoção deste tipo de dispositivo é justificável nos casos em que a fundação é excessivamente permeável à água de infiltração, o que em geral ocorre na presença de formações arenosas, depósitos de cascalhos ou na interligação de um número elevado de formigueiros.

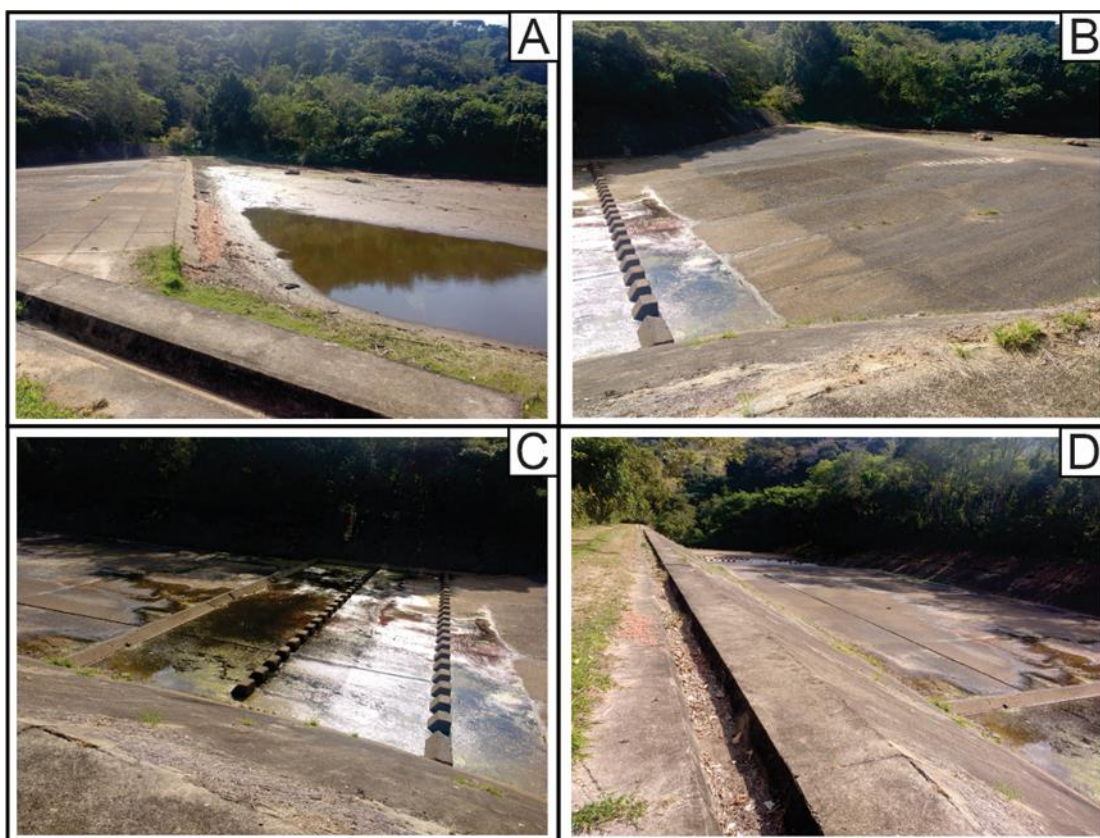


Figura 4.4. (A) e (B) Berma projetada para tomada d'água no vertedouro de concreto. Em períodos de baixa precipitação, a região de contato entre o concreto e o solo aluvionar permanece exposta e está sujeita a deterioração; (C) e (D) soleira de concreto para adução d'água, sobre a qual estão posicionadas sequências de dentes de concreto e calhas laterais para desobstrução do canal.

O vertedouro, estrutura essencial a manutenção do nível do reservatório, não pertence ao corpo do maciço e está situado 500 metros ao norte da barragem, com face voltada a montante do rio. A estrutura constitui um canal

para desvio d'água realizado em concreto armado cujas dimensões são, em média, 150 m de comprimento por 35 m de largura. A soleira do vertedouro (Figura 4.4) é revestida por conjuntos de dentes de concreto, com espaçamento variável, que têm como finalidade a retenção do material sólido transportado junto ao fluxo d'água, de maneira a evitar obstruções ou deterioramento que coloquem em risco a estabilidade da obra.

4.1.1 ANÁLISE PIEZOMÉTRICA E PLUVIOMÉTRICA

A empresa responsável pelo monitoramento geotécnico da barragem forneceu ao Observatório Nacional as leituras piezométricas, de medição do nível d'água, vazão de coletores e coordenadas UTM relativas ao período no qual foram realizadas as campanhas de aquisição de dados geofísicos. As leituras de auscultação são realizadas em intervalos de 3 a 4 dias, por técnicos especializados. Os dados faltantes, relativos aos dias em que o nível freático não foi verificado, tiveram de ser interpolados e, portanto, podem apresentar algum desvio com relação ao valor real.

Neste capítulo, a análise da piezometria consiste, primeiramente, na análise comparativa entre dois perfis, transversais ao eixo da barragem, que dispõem do nível freático no interior do maciço em momentos distintos (Item 1). A ideia é observar a variação do nível d'água dentro do aterro compactado entre os meses em que foram realizados levantamentos geofísicos, ou seja, outubro/2019 e março/2020. Em segunda análise, a comparação de gráficos com plotagem de altura piezométrica e nível relativo do reservatório (Item 2).

- **Análise da Variação freática no maciço**

O perfil esquemático a seguir (Figura 4.5) remete ao comportamento freático da barragem em corte perpendicular a crista, em sua porção meridional, com respeito a leituras de altura piezométrica de 7 piezômetros: SRPZ-FG, SRPZFA, PZ-28, SRPZ-60, PZ-30, PZ-29, SRPZ-37 (da crista até a base sobre a fundação). No caso, foram utilizados os dados do dia 12/10/2019,

representando a primeira campanha de aquisição de dados geofísicos e do dia 07/03/2020, representando a segunda campanha de aquisição.

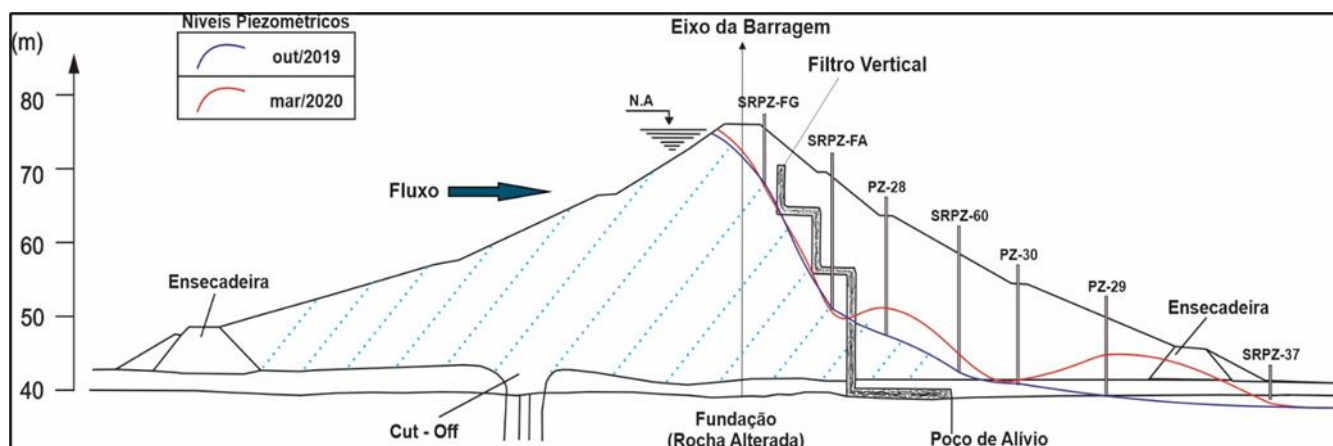


Figura 4.5. Níveis piezométricos em seção perpendicular à crista, em sua porção meridional, com respeito a sete piezômetros, nos meses de outubro/2019 e março/2020. Os traços de cor azul e vermelha remetem, respectivamente, ao mês de outubro/2019 e março/2020. A direção do fluxo d'água está indicada à montante do maciço de barragem.

As alturas piezométricas aferidas no mês de março/2020 indicam a maior saturação do solo no aterro, se comparadas ao mês de outubro/2019. O comportamento estaria associado a maiores índices pluviométricos durante o verão, estação mais chuvosa do ano em climas quentes e úmidos, em relação ao outono. O aumento na precipitação resulta em um aumento do nível do reservatório e, em decorrência, maiores taxas de infiltração e percolação d'água no maciço e obreiras. A tabela 4.1 apresenta os níveis piezométricos e de reservatório, aferidos para os meses em questão.

Tabela 4.1. Piezômetros e suas respectivas leituras

Piezômetro	12/out/19		07/mar/20		Cota da Boca (m)
	Nível do Reservatório (m)	Cota Piezométrica (m)	Nível do Reservatório (m)	Cota Piezométrica (m)	
SRPZ - FG	78,70	74,31	78,86	74,30	82,24
SRPZ - FA	78,70	57,76	78,86	57,73	76,31
PZ - 28	78,70	54,66	78,86	58,32	70,85
SRPZ - 60	78,70	50,88	78,86	51,51	66,44
PZ - 30	78,70	50,52	78,86	50,97	63,99
PZ - 29	78,70	51,56	78,86	51,84	56,88
SRPZ - 37	78,70	51,63	78,86	52,09	55,06

O gráfico de pluviometria (Figura 4.6) ilustra o comportamento das chuvas para o período de 1 ano, entre março de 2019 e 2020. Neste, é possível observar a maior constância e intensidade das chuvas no decorrer do verão em comparação as demais estações, o que sustenta o comportamento piezométrico observado. Os dados foram obtidos através de pluviômetros, modelo *Ville de Paris* (afere o volume da precipitação com base na altura em milímetros por metro quadrado), instalados nas imediações da barragem em questão.

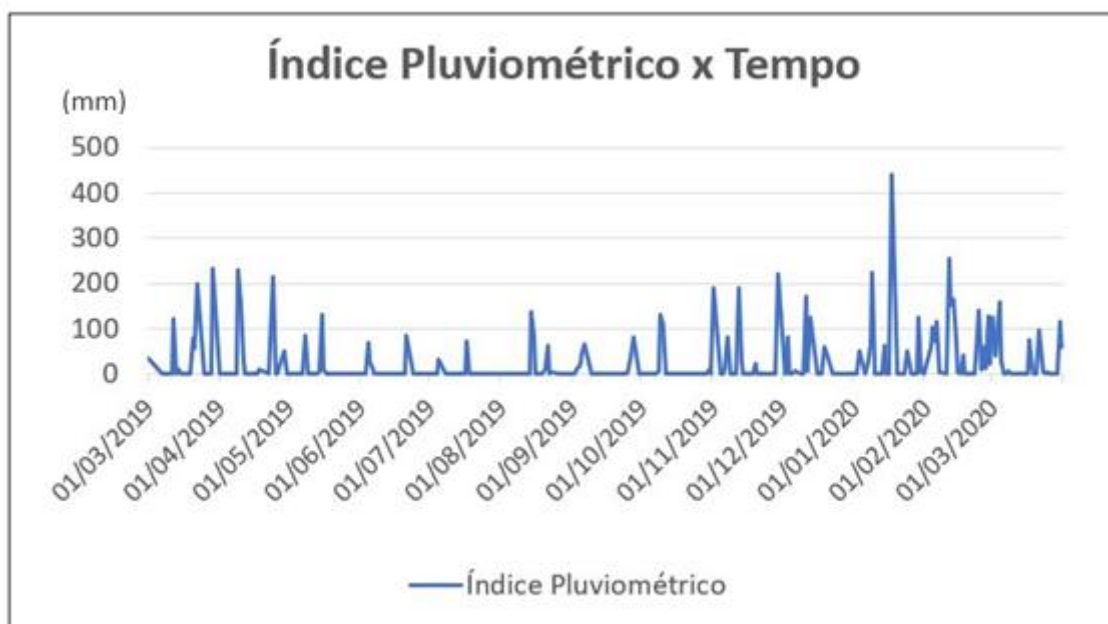


Figura 4.6. Índice pluviométrico na área de estudo, com valores de precipitação em milímetros, para o período compreendido entre março de 2019 e 2020.

- **Análise comparativa de altura piezométrica**

Na presente análise, os gráficos de altura piezométrica permitem analisar a constância das leituras ao longo do período de interesse. A altura remete a diferença entre a cota da boca e a cota piezométrica, ou seja, a distância entre o topo do poço de monitoramento e o nível freático, saturado em água. Foram plotados gráficos relacionados a ambos os períodos de aquisição de dados geofísicos, em três segmentos distintos da barragem: **Figura 4.7** - Porção central do maciço principal da barragem (piezômetros SRPZ-FG, SRPZFA, PZ-28, SRPZ-60, PZ-30, PZ-29, SRPZ-37); **Figura 4.8** - Ombreira direita (piezômetros

SRPZ-15, SRPZ-17, SRPZ-25, SRPZ-27); **Figura 4.9** - Ombreira esquerda (piezômetros PZ-46, SRPZ-33, SRPZ-35, SRPZ-37).

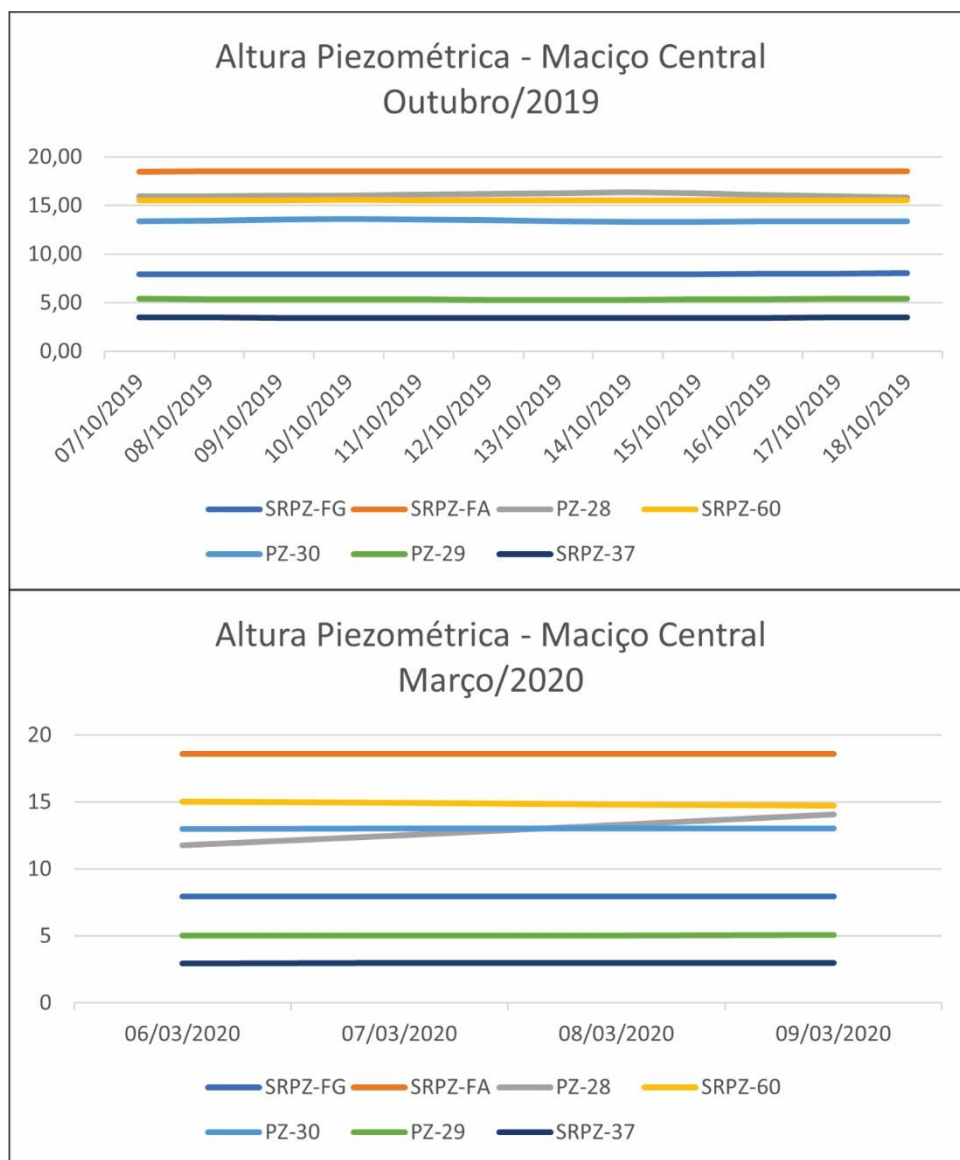


Figura 4.7. Alturas piezométricas no segmento central do maciço de barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.

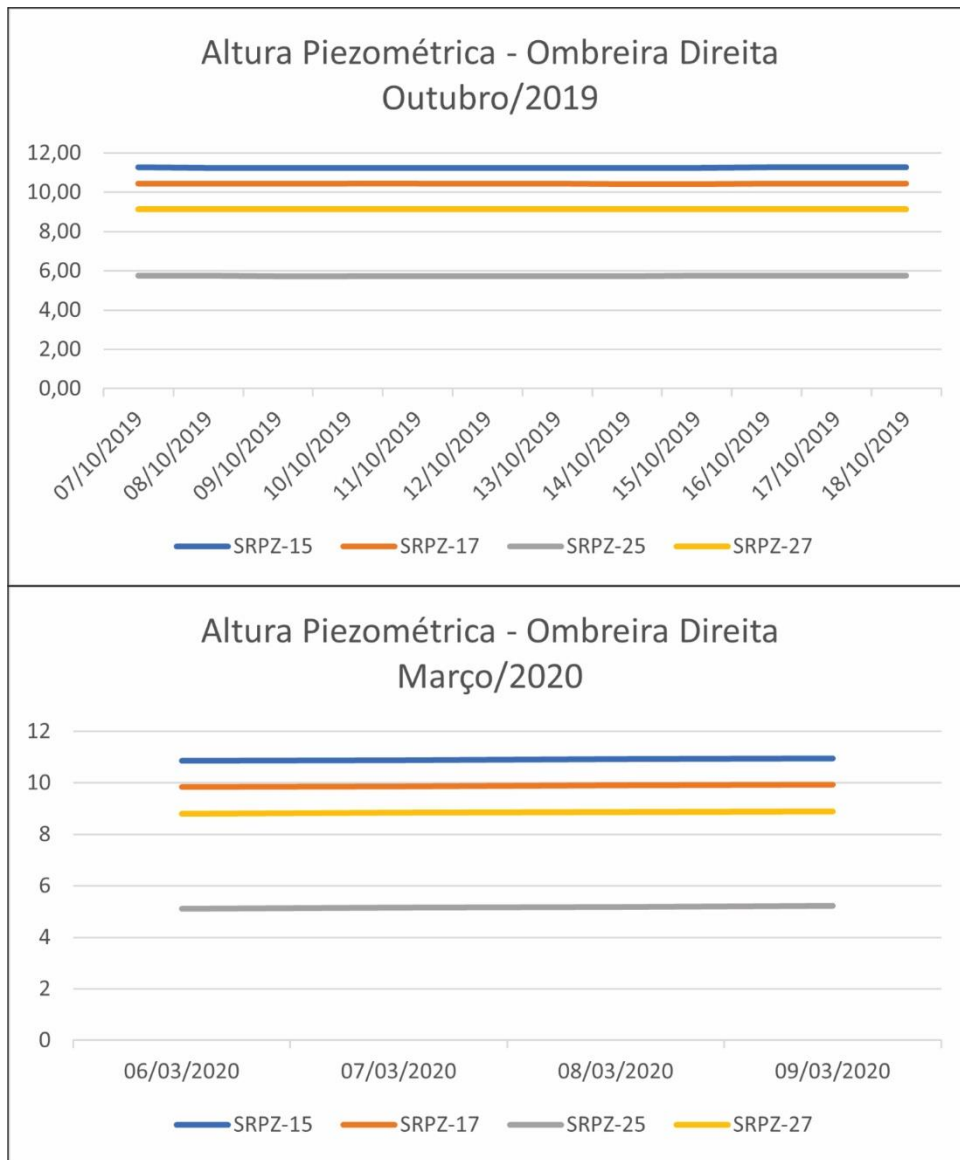


Figura 4.8. Alturas piezométricas ao longo de segmento da ombreira direita da barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.

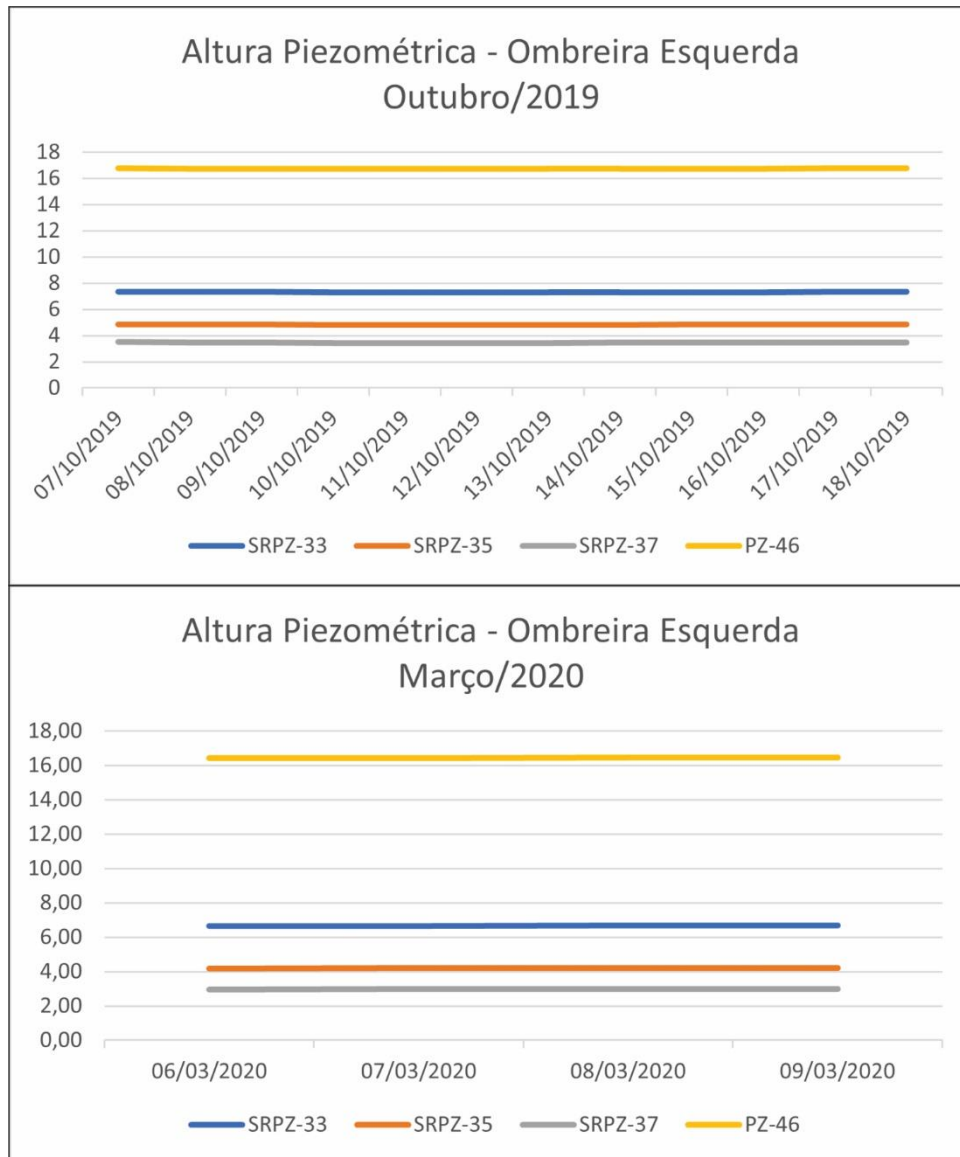


Figura 4.9. Alturas piezométricas ao longo de segmento da ombreira esquerda da barragem: (A) outubro/2019, (B) março/2020.

Nos três compartimentos analisados, o nível d'água parece comportar-se de maneira quase constante em curtas escalas de tempo, com variação diária pouco significativa (da ordem de centímetros a milímetros). O comportamento observado reflete a natureza do solo argiloso compactado, predominantemente impermeável, sujeito apenas a percolação de água condicionada à poro pressões, cujo controle é realizado com o auxílio de filtros, drenos e instrumentos de monitoramento. Oscilações pontuais de pequena relevância mostram-se presentes na ombreira esquerda, em conformidade com sutis alterações no nível do reservatório, dada a redução da ocorrência e intensidade das chuvas.

Alterações relevantes de cota ocorrem em escalas de tempo de mais longa duração (meses a anos), dada a mudança do regime pluviométrico e a passagem das estações. Ainda assim, um tempo de estabilização expressivo sucede períodos de precipitação intensa, durante o qual o solo lentamente escoar parte do volume de água. Neste sentido, a geometria do maciço deve, necessariamente, alongar horizontalmente o caminho que a água percorre até alcançar o filtro, de maneira a minimizar a energia e velocidade do fluxo aquoso e, assim, evitar que partículas sólidas sejam carregadas em direção a jusante (processo de liquefação).

4.2 Aspectos Geológicos Regionais

A região condizente à barragem de interesse situa-se no contexto geomorfológico da Serra do Mar, em um trecho de integração com o Graben Campo Grande – Guanabara – Rio Bonito. O relevo é acidentado e apresenta diversos vales fechados, cujas cristas mais altas dispõem-se na direção N25 - N30E. A leste da obra, as estruturas regionais de maior proeminência estão condicionadas aos principais lineamentos tectônicos no estado do Rio de Janeiro, de direção média N60E. Com relação aos cursos fluviais responsáveis pela recarga do reservatório de água, os vales e rios secundários constituem um sistema morfológico retangular, acomodados segundo as direções N25–N30E (principal) e N60–N70W (secundária).

A rede hidrográfica apresenta geometria ideal para a construção de uma barragem, uma vez que a bacia de acumulação é esculpida em vales que se fecham em funil, com nível de base e saída voltados para a Baixada Fluminense. Desta maneira, a montante do talvegue de rio que alimenta o reservatório em questão, está presente uma vasta bacia de alimentação, com grande potencial de abastecimento dada a quantidade de afluentes e constância de chuvas ao longo do ano.

Com relação ao domínio estrutural, conforme definido por Almeida et al (1977, 1981), a área está presente no segmento central da Província Mantiqueira e, portanto, apresenta suas principais feições geológicas relacionadas ao evento termo-tectônico Brasileiro/Pan-Africano, de idade Neoproterozóica, cuja origem

remete a aglutinação final do continente Gondwana Ocidental (Heilbron et al., 2004). Com base no Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro (Silva & Cunha, 2001), em escala 1:400.000, a área de estudo foi identificada como pertencente a unidade Rio Negro, na parte central da Faixa Ribeira. Os itens a seguir discorrem quanto às características básicas destes compartimentos.

4.2.1 FAIXA RIBEIRA

A porção do segmento central da província que reflete a geologia de boa parte do estado do Rio de Janeiro é o Orógeno ou Faixa Ribeira, um complexo cinturão de dobramentos de *trend* NE – SW que resulta da interação entre a margem sudeste do cráton São Francisco e outras placas, arcos de ilha e, principalmente, a porção sudoeste do cráton do Congo, que marca uma colisão continental (Heilbron et al., 2017). Neste contexto, tal cinturão compreende os seguintes terrenos tectono-estratigráficos: Ocidental, Paraíba do Sul – Embú, Oriental e Cabo Frio. Estes são limitados entre si através de zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas ou falhas de cavalgamento.

Segundo Tupinambá et al (2007, 2012), a porção central da Faixa Ribeira, ao longo do estado do Rio de Janeiro, compreende rochas pertencentes aos domínios estruturais: Cambuci, Costeiro (que nesta região remete ao Complexo Rio Negro) e a *Klippe* de Italva.

4.2.2 COMPLEXO RIO NEGRO

Segundo Tupinambá et al (2012), o complexo se estende por mais de 300 km segundo a direção NE–SW, consistindo ortognaisses, de origem plutônica, que foram intrudidos em meio aos metassedimentos pelíticos de alto grau do Grupo São Fidélis, no Domínio Costeiro (Terreno Oriental). Em geral, os principais litotipos variam entre ortognaisses a granitoides (diorito, tonalito gnaisse, leucogranito e gnaisse porfiróide), havendo ocorrência de migmatitos e anatexitos. Os gnaisses apresentam como protólito rochas magmáticas pertencentes a sequências do tipo TTG, ou seja, tonalitos, trondhjemitos e granodioritos, em sua maioria.

4.3 Caracterização da Geologia no Local do Sítio da Barragem

Na área de implantação da barragem o litotipo predominante é o migmatítico estromático, caracterizado por faixas de paleossoma gnáissico mesocrático, com hornblenda e biotita. O neossoma é granítico a pegmatítico, com composição quartzo-feldspática, leucocrático e granulação grossa. O migmatito aflora, em especial, na ombreira direita e em direção ao sul da barragem, sendo cortado por um dique lamprófiro de atitude N70E–85S.

Na porção relativa à ombreira esquerda e nas imediações do reservatório, ocorre um gnaiss leucocrático, de granulação grossa, que corresponderia ao neossoma do gnaiss observado na ombreira direita.

A atitude da foliação gnáissica e migmatítica é bastante uniforme, com direção variando de N25E a N32E, e mergulho entre 50N até vertical. A única exceção observada corresponde às imediações da ombreira direita, próximo ao eixo da barragem, com foliação de atitude variando entre EW–75N e N40W-65S, o que sugere a ocorrência de dobras no maciço rochoso (Figura 4.10).

O topo do maciço rochoso ocorre a cerca de 30 m de profundidade sob a fundação. Acima desta profundidade, a rocha encontra-se alterada ou já obliterada na forma de solo de alteração autóctone (resultante da alteração das rochas sobrejacentes *in situ*, no caso, migmatito e gnaiss). O solo é representado por areias de granulometria média a grossa, siltosas e micáceas, atingindo a espessura de até 35 m. Em meio ao solo de alteração de rocha, são identificados níveis de rocha quase alterada de composição quartzo – feldspática, relativos ao neossoma do migmatito estromático.

A margem esquerda do talvegue de rio é caracterizada por depósitos de talús, com espessuras de até 25 m, refletindo a presença de matacões misturados a calhaus muito angulosos e heterogêneos, mobilizados devido a ação gravitacional em clima mais seco, pretérito ao atual.

Por fim, na região relativa à margem direita do rio, ocorre um solo coluvionar, alóctone, com espessura média de 7 m, matriz de composição argilo – arenosa - siltosa e importante quantia de calhaus e seixos arredondados. Este, ocorre de maneira irregular em todo o sítio da barragem, repousado sobre o solo

autóctone. Tal material representaria o manto de intemperismo recente do migmatito em clima úmido e seco.

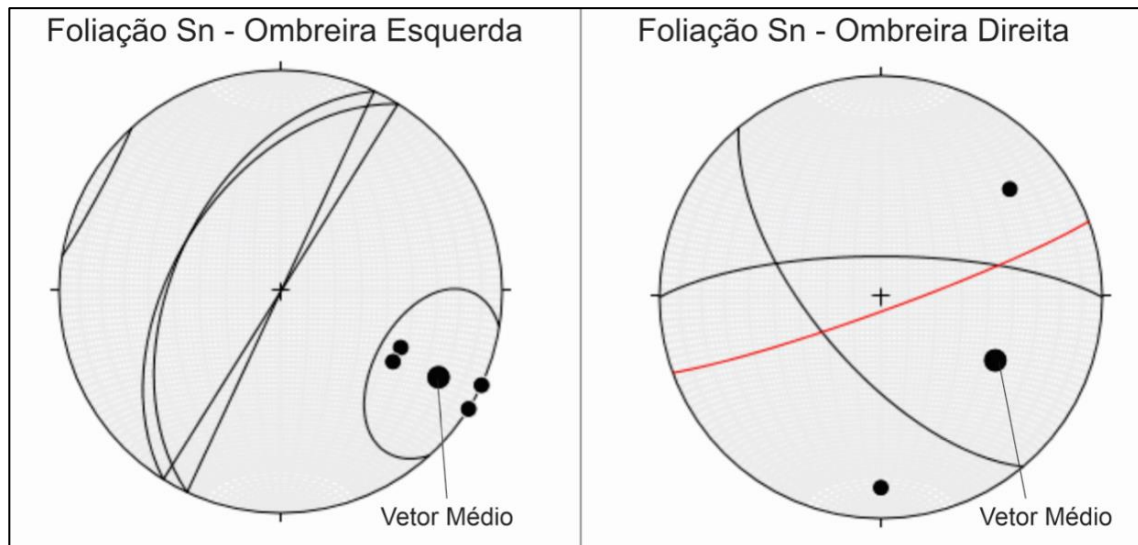


Figura 4.10. (esquerda) Atitude da foliação gnáissica-migmatítica média (Sn) nas imediações da ombreira esquerda, plotada junto aos polos e vetor médio destes; (direita) Foliação gnáissica-migmatítica média (Sn) nas imediações da ombreira direita, plotada junto aos polos e vetor médio. A intersecção dos planos de foliação, próxima ao eixo axial, sugere a ocorrência de uma dobra. O plano em vermelho remete ao dique lamprófito, que intersecta as rochas da fundação.

5. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS

Os dados de tomografia de resistividade elétrica (ERT) e polarização induzida (IP) foram coletados em duas campanhas de aquisição. A primeira campanha foi realizada no período entre 07/10/2019 e 18/10/2019. A segunda campanha foi realizada entre os dias 06/03/2020 e 09/03/2020. Apenas na primeira etapa houve a aquisição de perfis de GPR. Para correção altimétrica e georreferenciamento das linhas, foram coletados, durante a primeira campanha, dados de posicionamento geodésico com auxílio do gps diferencial GNSS.

A realização de duas campanhas objetiva registrar o comportamento interno da barragem em momentos climáticos distintos, com base em mudanças do regime pluviométrico e, conseqüentemente, no nível do reservatório. A metodologia adotada visa a identificação do avanço de plumas, assim como uma análise descritiva do comportamento periódico do solo empregado na barragem.

Tudo que foi utilizado é de propriedade do *pool* de equipamentos do Observatório Nacional. A equipe de engenharia responsável pela barragem, contudo, forneceu dados piezométricos relativos ao período de realização das campanhas de aquisição e que serviram de base para a interpretação da informação coletada. Os dados originais cedidos não são aqui apresentados, uma vez que sua divulgação compromete o respeito ao termo de confidencialidade assinado junto à empresa que nos concedeu acesso à barragem e autorizou a realização da pesquisa nas imediações da represa.

5.1 Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)

Em um primeiro momento, foi realizada a coleta de dados durante o primavera de 2019, período, este, pouco chuvoso e, por conseguinte, com o reservatório de água depletado. Posteriormente, na segunda campanha, os mesmos ensaios foram feitos durante o período chuvoso, no verão de 2020. Contudo, na segunda aquisição, foi necessário esperar o cessar das chuvas, para que o nível freático se estabilizasse no interior do maciço da barragem e de forma a evitar danos potenciais aos equipamentos.

Os dados de resistividade elétrica foram coletados em sete linhas, sendo as seis primeiras (Linha 1 a 6) paralelas ao coroamento da barragem e a última (Linha 7) perpendicular a este. Os perfis cruzam, portanto, as ombreiras esquerda e direita, além de percorrer o maciço da barragem. Estas linhas foram executadas nas duas campanhas de aquisição de dados, para que os dados fossem confrontados e analisados de forma conjunta. Foi gerado um total de 14 perfis, totalizando 1244 metros, lembrando que, na primeira campanha, o ensaio foi realizado em dois momentos, com intervalo aproximado de uma semana (Tabela 5.1).

A Linha 1 foi realizada na estrada posicionada sobre a crista (coroamento) do maciço. As demais foram realizadas paralelamente a primeira, em posições intermediárias do talude, conforme mostra o mapa da figura 7.1. A Linha 6 foi posicionada imediatamente sobre a fundação. A Linha 7, transversal ao eixo da barragem, percorre todo o parâmetro de jusante, partindo da crista em direção à fundação, na base.

Tabela 5.1. Linhas de ERT

Linhas de Eletrodos - Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)					
Linha de Eletrodos	Arranjo	Corrente	Intervalo de Tempo	Tamanho da Linha	Último Eletrodo
L1	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	208 m	52
L2	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	168 m	42
L3	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	172 m	43
L4	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	184 m	46
L5	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	192 m	48
L6	Dip-Dip 56	2,0 A	1,2 seg	208 m	52
L7	Dip-Dip 28	2,0 A	1,2 seg	112 m	28

No levantamento, foi utilizado o equipamento Supersting R8 Earth Resistivity/IP, da marca Advanced Geosciences (AGI), com oito canais. Ele consiste em um módulo resistímetro (que também pode ser habilitado para aquisições do tipo IP), uma *switch box* externa, quatro cabos multicondutores emborrachados e 56 eletrodos polarizáveis, os quais consistem em hastes de aço inox que foram fincadas no solo do aterro (Figura 5.2). As distâncias foram verificadas com o auxílio de trenas. Para alimentação do sistema foram utilizadas

duas baterias de 12 V. Nas linhas ERT a intensidade da corrente artificial empregada foi de 2 A, com intervalo de tempo de injeção de 1,2 segundos.

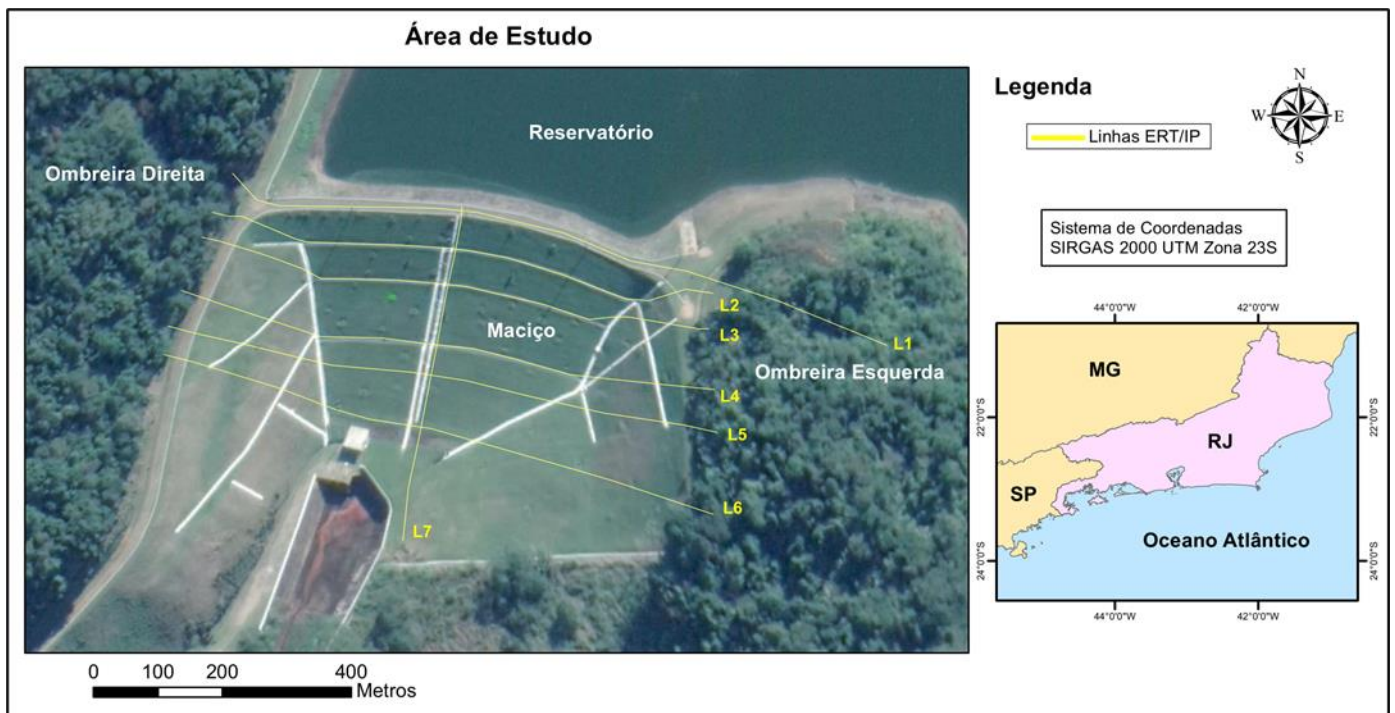


Figura 5.1. Mapa da barragem, ilustrando a posição das linhas de ERT/IP.

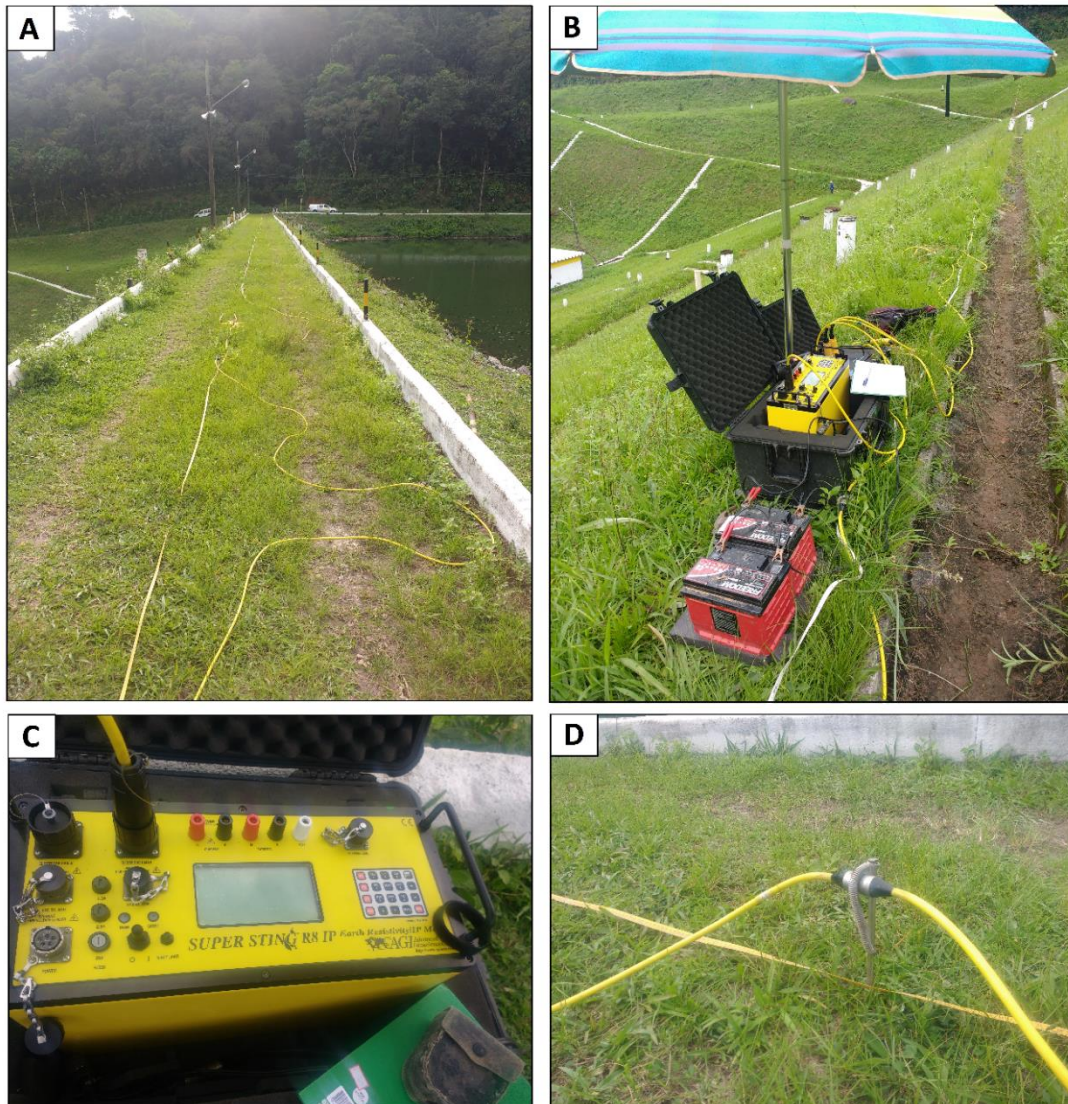


Figura 5.2. (A) Disposição dos eletrodos polarizáveis de aço, conectados entre si através de cabos multi-condutores, sobre a crista da barragem, durante aquisição ERT; (B) Estação de aquisição do método ERT na linha de eletrodos L3, paralela a crista da barragem. O sistema consiste no módulo resistímetro do SuperSting, o *switch box*, duas baterias de alimentação de 12 volts e cabos multi-condutores, os quais estão conectados aos eletrodos polarizáveis; (C) Módulo do SuperSting R8/IP, da marca AGI, utilizado no levantamento; (D) Eletrodo polarizável de aço *inox* conectado a um cabo multi-condutor, durante aquisição na crista da barragem.

Para cada injeção de corrente, a diferença de potencial entre nove eletrodos pode ser determinada simultaneamente, o que se traduz em economia de tempo no momento do levantamento. O resistímetro utiliza dezenas de eletrodos simultaneamente e, portanto, necessita de um sistema de comutação que aciona seletivamente os pares de eletrodos transmissores (A, B) e receptores (M, N), de acordo com os parâmetros inseridos pelo usuário. No caso

do SuperSting, o *Switch Box* atua como uma caixa comutadora externa, conectada ao sistema por meio de cabos multicanais e, também, alimentado por baterias de 12 volts. Resumidamente, o dispositivo determina quais são os eletrodos de corrente e de potencial e, desta forma, define o ponto de injeção de corrente e o ponto de verificação da diferença de potencial, em acordo com o arranjo escolhido (dipolo-dipolo, polo-dipolo, dentre outros), direcionando a corrente para o lugar correto.

A montagem das linhas de eletrodos envolveu a fixação das hastes polarizáveis, com espaçamento relativo de quatro metros, segundo a direção da linha. Estes, foram conectados aos cabos multicondutores e, então, ao módulo resistivímetro. Após alguns testes (realizados no dia 07/10/2019), foi decidido que o arranjo mais adequado às finalidades da pesquisa seria o Dipolo-Dipolo e, portanto, este foi empregado em todas as linhas. Vale ressaltar que a quantidade de cabos multicondutores e eletrodos utilizados em cada perfil variou de acordo com o comprimento total das linhas e inclinação dos taludes. Nas linhas mais extensas, foram necessários até quatro cabos e 52 eletrodos.

Anteriormente à aquisição dos dados de resistividade aparente, foi necessário testar a resistência de contato em cada eletrodo da linha. Para melhorar a condutividade em eletrodos com resistência muito alta, foi despejada uma solução de água com sal. Procurou-se evitar a colocação de eletrodos próximo a estruturas de concreto, como calhas e escadas, de forma a amenizar a coleta de dados ruidosos.

Durante o levantamento, outras ferramentas foram necessárias. Foi essencial a utilização de trenas e bússola para orientação das linhas e determinação do espaçamento de quatro metros entre eletrodos, assim como o comprimento total das seções.

5.2 Polarização Induzida (IP)

Os perfis de polarização induzida (IP) coincidem com as linhas de ERT, ou seja, de L1 a L7, sendo a última perpendicular as demais (Figura 5.1). Assim como na resistividade, foram realizados 14 perfis, totalizando 1244 metros, com repetição das linhas após o intervalo aproximado de uma semana.

Para a aquisição, também foi utilizado o equipamento SuperSting R8/IP, da AGI, com oito canais, assim como o *switch box*, cabos multi-condutores e baterias de 12 volts. Para injeção de corrente e verificação da diferença de potencial, em cada ponto de amostragem, foram utilizados, respectivamente, eletrodos polarizáveis de aço (transmissores de corrente) e não polarizáveis (receptores de corrente).

Utilizar eletrodos polarizáveis para injeção de corrente e não polarizáveis, como eletrodos de potencial, é uma estratégia para redução do chamado efeito de polarização de eletrodo, que é uma das principais fontes de ruído no método. Tal fenômeno ocorre por acúmulo excessivo de carga na interface do metal condutor e o solo. Por tal motivo, as aquisições de IP não devem ser realizadas somente com eletrodos de aço.

Os eletrodos polarizáveis consistem em hastes de aço *inox*, iguais àquelas utilizadas para o ERT. Os não polarizáveis são caracterizados por um recipiente poroso preenchido por uma solução de sulfato de cobre (CuSO_4) e saturada em sal. O material é revestido com PVC (isolamento), com exceção de sua base, na qual está posicionada uma cápsula de cerâmica, através da qual a solução, lentamente, vaza para o solo, possibilitando a condução de eletricidade.

Nas linhas, foram intercalados eletrodos polarizáveis e não polarizáveis, um a um, com espaçamento relativo de 4 metros. Os potes de cerâmica foram colocados sobre o solo e conectados aos cabos multi-condutores por fios de cobre, enquanto as hastes metálicas foram fincadas diretamente no aterro. Para melhorar a condutividade do solo, foi despejada uma solução de água com sal e, em alguns casos, bentonita, uma argila coloidal pertencente ao grupo das esmectitas.

A parametrização utilizada no SuperSting, definida após ensaios realizados no primeiro dia de campo (07/10/2019), consistiu na configuração Dipolo-Dipolo estendido (56 eletrodos). Foi aplicada uma corrente de 2,0 A, com intervalo de tempo de injeção de 0,5 segundos.

A tabelas 5.2, a seguir, relaciona as linhas de IP com a parametrização utilizada, nas etapas 1 e 2 de aquisição, além de informações adicionais, como comprimento da linha e último eletrodo.

Tabela 5.2. Linhas de IP

Linhas de Eletrodos - Polarização Induzida (IP)					
Linha de Eletrodos	Arranjo	Corrente	Intervalo de Tempo	Tamanho da Linha	Último Eletrodo
L1	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	208 m	52
L2	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	168 m	42
L3	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	172 m	43
L4	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	184 m	46
L5	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	192 m	48
L6	Dip-Dip 56	2,0 A	0,5 seg	208 m	52
L7	Dip-Dip 28	2,0 A	0,5 seg	112 m	28

Os ensaios de IP foram realizados sistematicamente após as aquisições de ERT, sempre sendo checada a resistência de contato em cada ponto. O painel a seguir (Figura 5.3) ilustra o momento da realização de alguns perfis de IP.

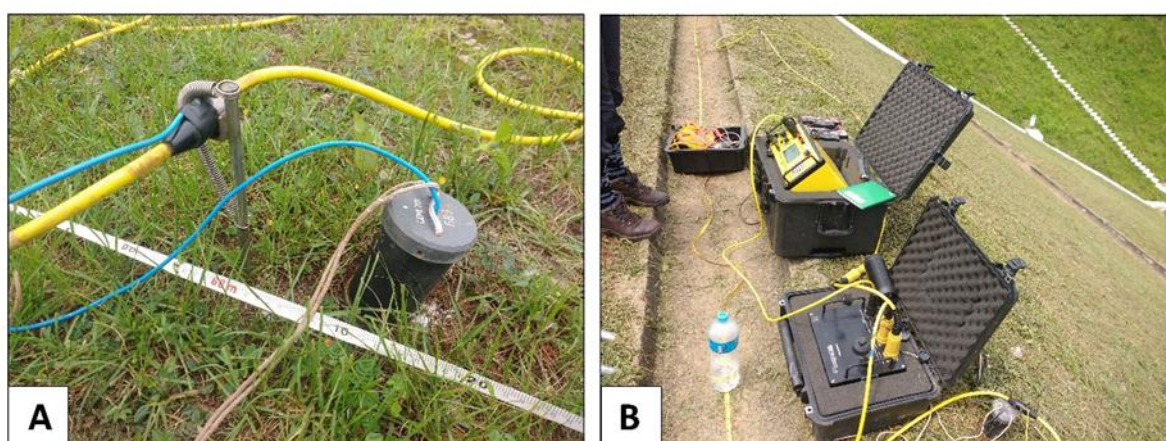


Figura 5.3. (a) Eletrodo polarizável e não-polarizável colocados sobre o solo durante aquisição do tipo IP, (b) Supersting R8/IP conectado a *switch box* durante aquisição IP na Linha 2.

Portanto, na montagem das linhas, foram intercalados eletrodos polarizáveis e não polarizáveis, do início ao fim da linha. Foi utilizada fita isolante para realizar a conexão entre a terminação dos recipientes cilíndricos e o cabo multicondutor.

5.3 Ground Penetrating Radar (GPR)

A aquisição de dados de GPR foi realizada apenas na primeira campanha de campo, em outubro de 2019. Foram realizadas seis linhas paralelas ao coroamento da barragem (Linha 1 a 6), sendo que a primeira foi posicionada imediatamente sobre a crista do maciço e a última acima da fundação (Figura 5.4). Não foi realizada uma linha transversal, devido a inviabilidade do método em terrenos com inclinação muito acentuada.

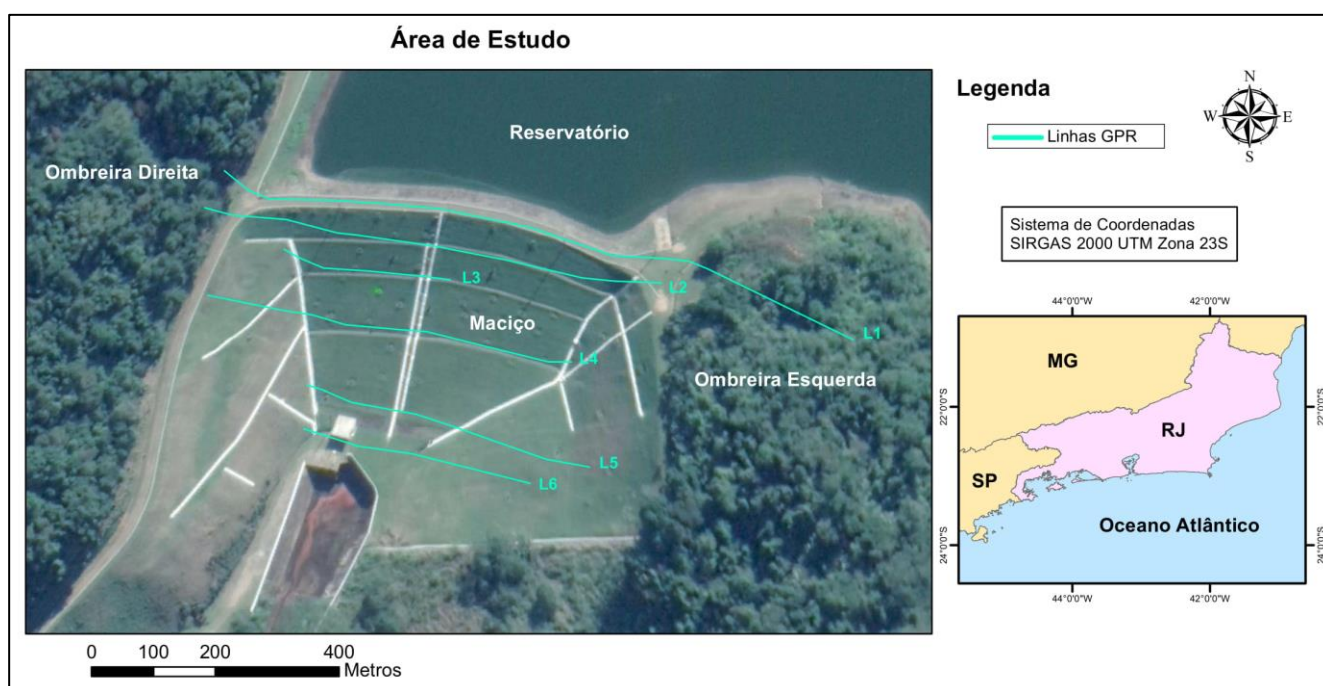


Figura 5.4. Mapa da barragem, ilustrando a posição das linhas de GPR.

Na aquisição foi utilizado o equipamento *Professional Explorer* (ProEx) system, da marca Mala GPR (que opera na faixa de 25 a 200 Hz), com unidade de controle digital portátil, duas antenas, não blindadas, de 100 Hz e mochila acessório. O sistema de aquisição ainda conta com um módulo digital portátil, no qual a visualização dos dados pode ser feita em tempo real, e uma bateria

externa de 12 V. Com relação à parametrização, foi utilizado intervalo de tempo de 1 segundo entre aquisições e valores de *range* variáveis, de acordo com cada linha (Tabela 5.3).

No caso, foi utilizado o método *Common Offset* (CO), em que o espaçamento relativo entre as antenas transmissora e receptora é constante. Para tanto, um suporte de madeira foi posicionado entre ambas, de maneira a tornar fixa a distância. Em seguida, as antenas foram posicionadas sobre uma lona plástica que, com o auxílio de uma corda, foi arrastada ao longo de cada linha, possibilitando a propagação e captação dos pulsos eletromagnéticos pelo sensor.

Tabela 5.3. Linhas de GPR

Linhas de GPR				
Linha	Frequência da Antena	Range	Intervalo de Tempo	Tamanho da Linha
L1	100 MHz	667,3 ns	1 seg	208 m
L2	100 MHz	952,5 ns	1 seg	149 m
L3	100 MHz	652,0 ns	1 seg	55,5 m
L4	100 MHz	652,0 ns	1 seg	121 m
L5	100 MHz	652,0 ns	1 seg	95,5 m
L6	100 MHz	652,0 ns	1 seg	75,5 m

Além das seis linhas de *common offset*, também foi feito o *common mid point* (CMP) na estrada sobre a crista da barragem, método este que permite estimar a velocidade das ondas eletromagnéticas em função da profundidade de alcance do sinal. Para tanto, um ponto intermediário, fixo, foi definido no centro do maciço da barragem, para que as antenas transmissora e receptora fossem gradativamente afastadas em relação a este ponto. A figura a seguir mostra, em detalhe, o equipamento utilizado para o CMP e CO (Figura 5.5).



Figura 5.5. GPR ProEx System, da marca Mala, utilizado na primeira campanha de aquisições geofísicas. O suporte de madeira serve para espaçar as antenas no método *common offset*. O monitor digital é transportado em uma unidade portátil, junto a bateria externa.

5.4 Global Navigation Satellite System (GNSS)

O GNSS foi utilizado para correção altimétrica das seções bidimensionais adquiridas por meio dos métodos de ERT, IP e GPR. Com o mesmo equipamento foi possível determinar, além da altitude, coordenadas geográficas em diversos pontos da barragem, o que serviu para confecção de mapas e georreferenciamento das linhas em imagens de satélite Landsat 8. Em geral, a ferramenta se mostrou essencial para amarração e localização dos perfis, também contribuindo para realização de atividades complementares ao projeto em ambiente GIS (*Geographic Information System*), no caso, através da transcrição dos dados no software ArcGIS.



Figura 5.6. (a) Estação base GNSS instalada em posição central na crista da barragem, (b) Controle digital portátil TSC2, ferramenta útil no controle e armazenamento de dados de satélite coletados por meio das estações móveis.

O sistema disponibilizado pelo *pool* do Observatório Nacional para o projeto, é o Trimble R8s RTK (Figura 5.6), que consiste em um receptor GNSS, cuja tecnologia permite o rastreamento de uma ampla gama de satélites, além da transmissão de dados em tempo real. Na prática, uma estação base, fixa, deve ser instalada em algum ponto da área de estudo. Tal estação permanece em funcionamento durante toda a aquisição, enquanto as estações móveis (ou *rover*) são distribuídas em diferentes regiões, coletando dados de GPS e altimetria.

A estação base foi colocada na porção central da crista da barragem, enquanto outra antena foi usada para coleta dos demais pontos de GNSS, em estações móveis. Foi essencial, durante o trabalho, determinar bem o local da base e garantir a troca constante de sua bateria, de maneira a garantir a precisão dos demais pontos. Dados de correção geográfica foram fornecidos, via rádio UHF (*Ultra High Frequency*), por estações do IBGE, que se conectaram à base enquanto e mesma esteve em funcionamento.

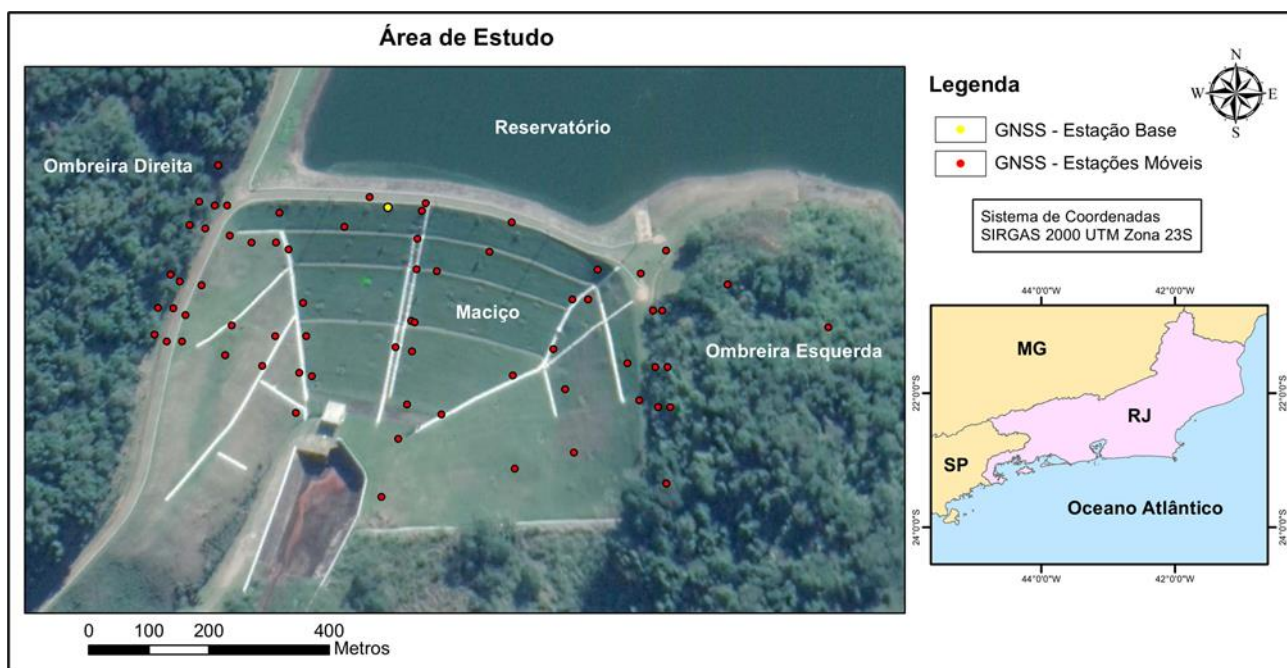


Figura 5.7. Mapa da barragem, ilustrando os pontos coletados com o GNSS Trimble R8s RTK. O ponto em amarelo representa a posição da estação base, enquanto os pontos em vermelho remetem as estações móveis (*rover*), distribuídas ao longo do maciço e sobre as ombreiras.

Vale lembrar que o Trimble R8s ainda conta com o controle portátil digital TSC2 que permite o controle e ajuste das configurações de datum (que foi definido, no estudo, para WGS 84) do equipamento, assim como a coleta, leitura e armazenamento de dados. O mapa da Figura 5.7 exibe todos os pontos coletados por meio do GNSS durante a primeira campanha de campo na área de estudo, os quais foram utilizados para correção altimétrica e posicionamento das linhas.

6. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

6.1 Tomografia de Resistividade Elétrica

Foram adquiridos dados relativos a 7 linhas e todos foram processados segundo os mesmos critérios e rotina. Os itens a seguir descrevem, brevemente, as principais etapas do processamento.

- Processamento básico

Inicialmente foi realizada a exclusão de dados indesejáveis (remoção de ruído), definida a orientação dos eixos vertical e horizontal (profundidade e direção da linha, respectivamente) e fator de escala, no caso, 4 metros, em respeito ao espaçamento relativo entre eletrodos durante a etapa de aquisições.

Os dados foram, então, dispostos em pseudoseções de resistividade aparente, as quais representam a variação da resistividade medida (Ohm.m), em função de profundidade (m). Os dados ruidosos remanescentes foram excluídos manualmente, a partir de um editor de eletrodos, o qual realiza uma listagem de todos os eletrodos, elegendo quais são mais ou menos problemáticos.

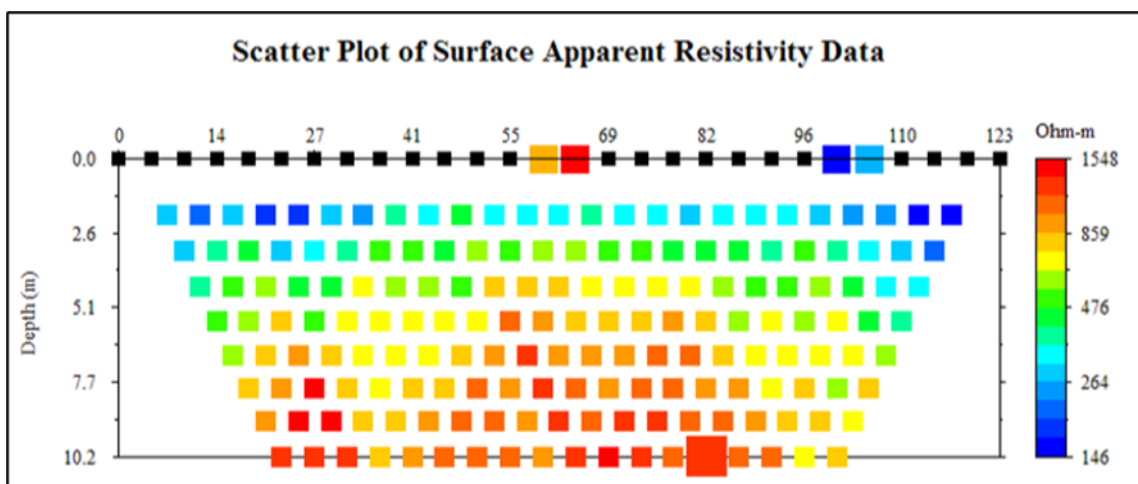


Figura 6.1. Gráfico de dispersão dos dados de resistividade aparente em superfície. As cores quentes representam eletrodos de corrente e as frias eletrodos de potencial. Também é possível observar o efeito em profundidade resultante do ruído gerado pelos eletrodos.

Também foram plotados gráficos de dispersão dos dados de resistividade aparente, destacando os eletrodos, em superfície, de corrente e potencial que apresentaram algum tipo de problema. No caso, as cores quentes representam eletrodos de corrente e as cores frias eletrodos de potencial (Figura 6.1).

Outro método de edição consistiu na análise do histograma de desajuste (*misfit*) dos dados, em função do número total de dados. O *misfit* é definido como a razão: (dados calculados – dados medidos) / (dados medidos), sendo que os dados medidos remetem a resistividade aparente. Valores de desajuste superiores a 50% foram considerados como erro e, portanto, excluídos.

- Inversão dos Dados

Em aquisições ERT, o processo de inversão requer a aplicação de procedimentos de modelagem numérica 2D, cujas soluções incluem, por exemplo, aproximação por diferenças finitas. No caso, a inversão é do tipo não linear e sua solução depende de um modelo hipotético, cujos parâmetros são atualizados quando aplicado um procedimento de ajuste linear iterativo (Samouelian et al., 2005).

A simulação de um modelo complexo de variação de resistividade depende da discretização do meio em várias células ($j = 1, \dots, m$). O parâmetro físico (resistividade) é ajustado a cada célula (m_j , com $j = 1, \dots, m$). Os dados de resistividade aparente podem ser representados por meio da seguinte equação não linear:

$$d_i = F_i(m_1, m_2, \dots, m_m) + e_i \quad (6.1)$$

Sendo (d_i) os dados observados ($i = 1, \dots, n$) e (F_i) o operador que permite o cálculo da resposta do modelo para uma determinada configuração de resistividade (m_j) em cada ponto de amostragem (i). O termo (e_i) remete ao erro do conjunto de dados observados. A resolução desta equação depende da linearização do problema, realizada a partir de um modelo inicial, que atribui valores fictícios na distribuição de resistividade (Sharma, 1997). Os dados

teóricos (C_i), do modelo inicial (hipotético), com valores fictícios de resistividade (m_j), são calculados a cada ponto ($i = 1, \dots, n$), segundo a equação linear:

$$C_i = F_i(m_1, m_2, \dots, m_m) \quad (6.2)$$

O termo (e_i) equivale a diferença entre os dados observados (d_i) e os dados teóricos (C_i):

$$e_i = d_i - C_i \quad (6.3)$$

O ajuste aqui descrito tem o intuito de determinar qual a distribuição de resistividade (m_j) que minimiza a diferença observada entre os dados observados e hipotéticos, do modelo inicial.

No presente trabalho, foi utilizado o software *Earth Imager 2D*, disponibilizado pela *Advanced Geosciences Inc.* (AGI) para inversão dos dados e geração de seções 2D, ou tomogramas, de resistividade real. O software em questão utiliza dos princípios teóricos discutidos nos parágrafos anteriores, recorrendo a modelagem direta na determinação da diferença entre os dados observados e calculados de resistividade aparente, a partir de um número finito de blocos (Case, 2012).

O número máximo de iterações a ser atingido na modelagem, assim com o erro quadrático médio (rms), é estabelecido pelo usuário. Em seguida, é realizada a inversão do modelo direto, o que resulta no tomograma utilizado, posteriormente, na etapa de interpretação (Earth Imager 2D Instruction Manual, 2007). Finalizada a inversão, a seção de resistividade invertida pode ser visualizada na interface do software (Figura 6.2). Com relação as unidades de medida, as distâncias vertical e horizontal são fornecidas em metros. A resistividade real é dada em Ohm.m.

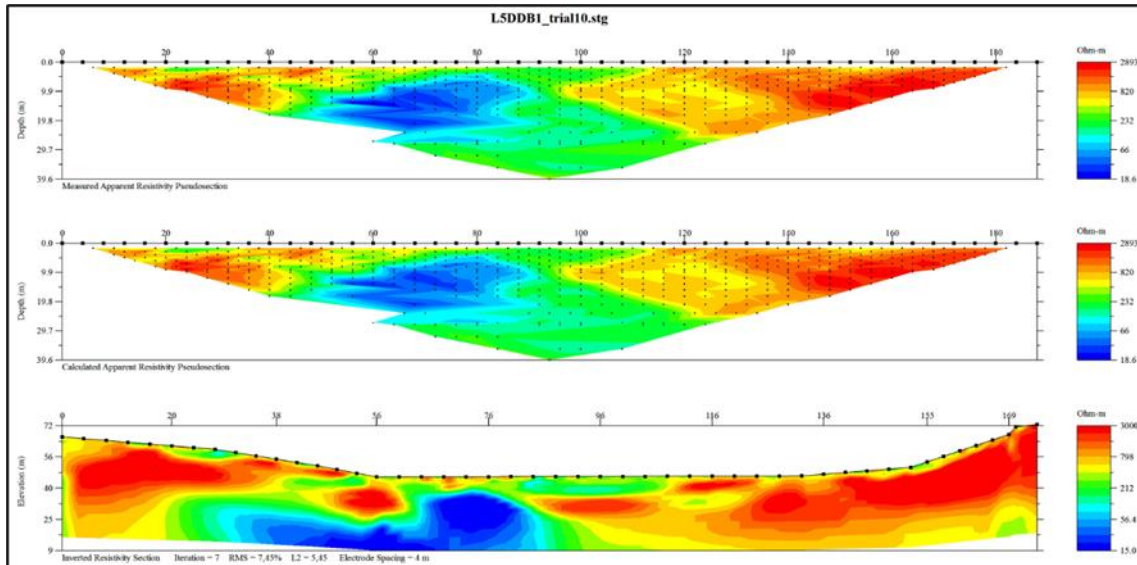


Figura 6.2. (de cima para baixo) Pseudoseção de resistividade aparente medida; Pseudoseção de resistividade aparente calculada; Seção de resistividade invertida.

- Ferramentas Adicionais

A partir de curvas de resistência de contato, valores de resistência superiores a 10 mil Ohms, os quais indicam que o eletrodo foi mal instalado ou apresenta defeito, foram excluídos das seções. Foram aceitos valores inferiores a 5 mil ohms, sendo o ideal, no entanto, números inferiores a 2 mil ohms.

Por fim, a partir dos dados coletados com gps diferencial GNSS, a correção topográfica das seções foi realizada,

- Inversão Time-lapse

No caso, foi aplicado um diferencial entre os dados coletados na segunda campanha de aquisições (março/2020) e primeira campanha Etapa 1_B1 (outubro/2019). O método foi utilizado nas sete seções, ou seja, L1 (crista), L2, ..., L7 (seção transversal).

A aplicação da inversão por *time-lapse* permite a determinação da variação percentual de resistividade entre dois, ou mais, momentos de tempo

distintos. No caso, realizou-se o cálculo do diferencial entre as seções 2D obtidas na Etapa 1_B1 e Etapa 2, objetivando a identificação de mudanças significativas no regime hidrológico interno da barragem, assim como potenciais zonas de erosão e transporte de materiais.

As anomalias positivas, de cor laranja e vermelha, remetem a regiões em que houve aumento de resistividade. Ou seja, de outubro/2019 para março/2020, a região tornou-se menos susceptível a passagem de corrente elétrica. No caso, das anomalias negativas, de cor azulada, o material tornou-se mais condutivo, permitindo o acúmulo de cargas e passagem de corrente. O segundo caso reflete um cenário pouco mais preocupante, uma vez que pode evidenciar zonas de erosão e infiltração, fatores, estes, que comprometeriam a estanqueidade da estrutura do aterro.

- Inversão 3D

A confecção dos três blocos de resistividade (etapas 1_B1 e 2) foi realizada no software EarthImager 3D, através da combinação das seções paralelas de resistividade L1, L2, ..., L6, geradas no software EarthImager 2D. A combinação das linhas resultou em blocos homogêneos de resistividade, os quais foram editados junto aos dados de altimetria.

6.2 Polarização Induzida

Foram adquiridos dados relativos a 7 linhas. A polarização induzida segue a mesma rotina de processamento da tomografia de resistividade elétrica, sendo realizada no mesmo software, EarthImager 2D, e consistindo no mesmo tratamento de dados.

Em IP, a interpretação quantitativa de feições geológicas é mais complexa, se comparada ao ERT, porque as respostas geradas durante o processamento são computadas para feições simples (esferas, diques, contatos horizontais). Assim, torna-se necessária a aplicação da modelagem numérica.

Ensaio laboratoriais também auxiliam nas interpretações, pois permitem observar a resposta ao método em ambientes controlados, com parâmetros bem conhecidos (Kemna et al., 2012). Muitas das vezes, recorre-se, no entanto, apenas a interpretações qualitativas, as quais permitem inferir a distribuição espacial, formato, amplitude e simetria das anomalias.

Grande parte dos códigos usados na modelagem inversa e direta dos dados de IP, se baseiam no cálculo da cargabilidade, no domínio do tempo. Tais ferramenta possibilitam a geração de imagens 2D e 3D de subsuperfície a partir de aproximações lineares. Embora eficiente, o processamento limita-se a estudos quantitativos, aplicados a delimitação de corpos anômalos (Kemna et al., 2012). A modelagem com base em aquisições no domínio da frequência tem sido utilizada em algoritmos de inversão de dados de resistividade complexa. Nestes, considera-se além das correntes AC de baixa frequência, a influência externa de campos eletromagnéticos, que caracterizam uma fonte de ruído no método. Esta abordagem é aplicada em ensaios laboratoriais (Kemna et al., 2000; Zimmermann et al., 2008) e aquisições de campo (Slater & Binley, 2006; Kemna et al., 2004; Williams et al., 2009).

Com relação a apresentação dos dados de IP, podem ser gerados gráficos de cargabilidade, efeito de porcentagem de frequência, fator de metal e fase, plotados contra a localização dos eletrodos na superfície (Telford, 1990). A escolha do arranjo, espaçamento e número de eletrodos tem influência sobre os sinais registrados nas curvas. Um método ainda mais comum de apresentação dos dados e, particularmente, útil para estudos relativos à geofísica aplicada, consiste na plotagem de seções invertidas de cargabilidade em função da profundidade

Os softwares de modelagem 2D, com os quais são invertidos os dados de resistividade e polarização induzida, no arranjo Dipolo-Dipolo, dispõe os dados em seções 2D de cargabilidade (Earth Imager 2D Instruction Manual, 2007). As regiões de elevada cargabilidade são, em geral, mais condutivas e, portanto, servem para delimitação de corpos mineralizados (metais disseminados, sulfetos, óxidos), saturação em fluidos e zonas enriquecidas em argilominerais (Figura 3.11). As seções obtidas podem ser interpoladas para geração de um

modelo 3D do terreno, o que permite a visualização da disposição estrutural e relações de contato das anomalias em profundidade.

Neste trabalho, foi selecionado método de inversão linear dos dados de IP, bastante comum em investigações geofísicas voltadas a estudos ambientais. Neste, é realizada apenas uma iteração durante a inversão, sendo um procedimento mais rápido em relação a inversão não linear. Para tanto, é necessário anteriormente, estipular um limiar de ruído aceitável, o que é feito variando-se os parâmetros de cargabilidade mínima e máxima (mV/V), além do coeficiente de correlação mínimo. Também é possível alterar o fator de suavização (*smoothness factor*), cujo efeito tende a minimizar o contraste existente entre a curva de desajuste e o modelo IP utilizado.

As demais etapas, da inversão aos ajustes finais de visualização, são exatamente iguais ao processamento de ERT. Os dados invertidos resultam em um perfil de cargabilidade e outro de resistividade real. Os perfis de resistividade real gerados pelo processamento ERT e IP puderam ser comparados. A inversão de dados resultou em perfis (Figura 6.3) satisfatórios às finalidades da pesquisa, com RMS reduzido e de fácil interpretação.

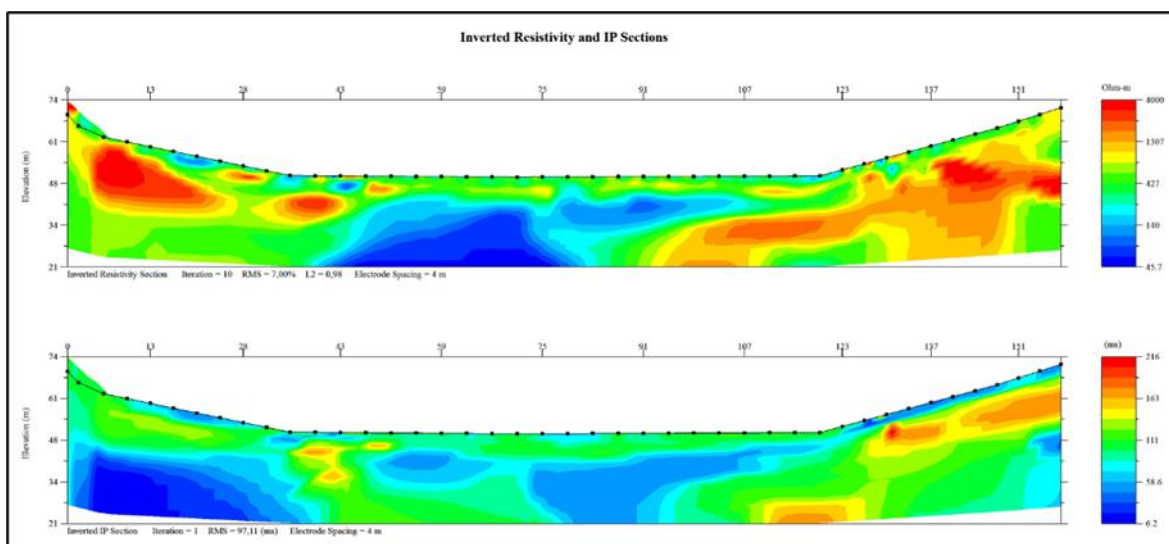


Figura 6.3. Seção de resistividade real (topo) e seção de IP real (base), da Linha 4, em aquisição do tipo IP Dipolo-Dipolo, realizada em outubro de 2019.

As aquisições de polarização induzida, neste estudo, estão associadas ao fenômeno de polarização de membrana, que ocorre na presença de minerais argilosos constituintes da matriz do material geológico. Quando aplicada uma

diferença de potencial, a nuvem catiônica (ou camada dupla) que envolve os argilominerais, promove um acúmulo de cargas negativas, permitindo, no entanto, a livre passagem das cargas positivas.

Retirada a diferença de potencial, as cargas tendem a retornar a sua posição original. No domínio do tempo, o método da polarização induzida permite a obtenção de medidas discretas de decaimento da voltagem, a partir do parâmetro de cargabilidade.

Vale afirmar que as anomalias observadas nos dados de ERT podem corresponder a presença significativa de eletrólitos, em meio aquoso, ou ao aumento do teor de argilominerais. Portanto não é possível distinguir, em uma seção de resistividade, se a anomalia condutiva observada remete a percolação de fluidos ou à presença excessiva de argilominerais. A aplicação do método de IP ajuda a remover o efeito de ambiguidade acusado nos dados de eletrorresistividade, uma vez que anomalias positivas de cargabilidade remetem, necessariamente, ao acúmulo de material argiloso

Anomalias de baixa cargabilidade e alta condutividade correspondem, mais provavelmente, a zonas de erosão e percolação de soluções eletrolíticas, o que é crítico em uma barragem de terra.

6.3 GPR

A conversão dos dados brutos de GPR em informação útil pode ser realizada segundo duas abordagens distintas, qualitativa ou quantitativa. A primeira consiste na confecção de pseudo-seções do meio em subsuperfície e, até mesmo, de blocos tridimensionais necessários à detecção e delimitação de anomalias e alvos de interesse (Jol, 2009). A abordagem quantitativa corresponde a aquisição de grandezas associadas a natureza ondulatória dos pulsos transmitidos, como velocidade, atenuação e impedância. Tais parâmetros podem, então, ser convertidos em outras grandezas, a depender da aplicação e objetivo do levantamento.

O fluxograma a seguir (Figura 6.4), permite observar as etapas básicas do processamento em GPR, dentre as quais estão a edição de dados, processamento básico, processamento avançado e visualização/interpretação.

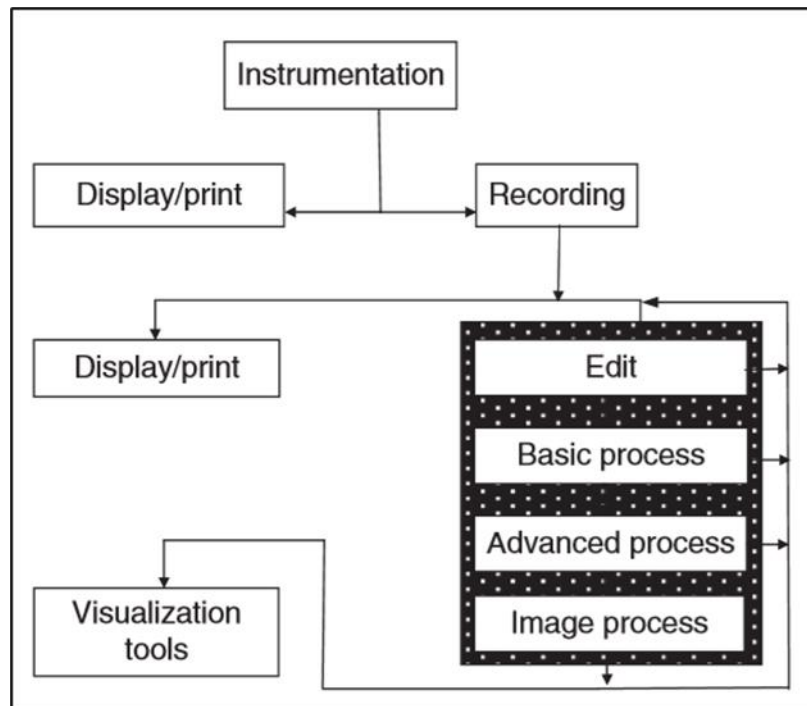


Figura 6.4. Fluxograma com as fases de aquisição, processamento, apresentação e visualização dos dados de GPR. As etapas de processamento estão destacadas no canto inferior direito (Jol, 2009).

- edição de dados

A primeira etapa do processamento é a edição dos dados armazenados após a aquisição. Consiste na reorganização e importação dos dados, geração e leitura de arquivos, atualização de informações de *background* e adição de dados de elevação, quando presentes. Erros na edição tendem a ser carregados para o restante do processo e, portanto, tal etapa deve ser realizada de maneira sistemática e atenta. É essencial verificar se os intervalos de amostragem temporal e espacial são os mesmos para todas as aquisições, além de checar se foi utilizado o valor correto de frequência central do sistema de aquisição (Annan, 1999).

- processamento básico

Segundo Annan (1999), o processamento básico envolve as operações de conversão dos dados brutos em um produto que seja aceitável para primeiras interpretações e avaliação de dados. Em alguns casos, este tipo de avaliação é aplicado em tempo real, no momento da aquisição, para que seja verificada a qualidade dos dados. Contudo, recomenda-se realizar novamente o processamento básico após o levantamento de campo, de maneira sistemática e recorrendo a utilização de operadores não casuais, que ajudam na remoção de ruídos e realce das feições de interesse.

Inicialmente, deve ser aplicado um filtro temporal no conjunto de dados, para remoção das componentes de mais baixa frequência, constantemente associadas a fenômenos indutivos ou ruídos gerados por limitações instrumentais. Tal operação é conhecida como *DeWow* (Jol, 2009).

A rápida atenuação do sinal que penetra no solo, tende a prejudicar a visualização das feições imageadas na base dos perfis de GPR. Torna-se necessária a aplicação de ganhos no tempo (*time gain*), ou seja, uma equalização de amplitudes, no domínio do tempo, que compensa a perda de sinal em profundidade. O método resulta no realce dos refletores mais fracos (Borges & Porsani, 2002).

Existem inúmeras maneiras de se aplicar o ganho, cada qual associada a um modelo físico específico (linear, exponencial, esférico, constante, *power*, programado, dentre outros). Uma opção é utilizar um controle de ganho automático, no qual os traços são processados individualmente para que, posteriormente, o sinal médio seja computado em uma janela de tempo. Em seguida, o ponto correspondente a porção central desta janela é amplificado, segundo a taxa desejada (Annan, 1999).

Após o ajuste de ganho, constantemente opta-se pela aplicação da filtragem temporal, ou seja, aplicada continuamente ao longo do eixo do tempo, no conjunto de dados. Existe uma gama ampla de filtros deste tipo, como o filtro passa banda, que utiliza de uma Transformada Rápida de Fourier, e uma série de filtros de convolução linear e não linear (Annan, 1999), cujo uso reduz a dispersão do sinal, maximizando a resolução (Jol, 2009).

Operações de filtragem similares podem ser aplicadas no domínio do espaço, como os filtros passa-alta (destaca estruturas com ângulo de mergulho acentuado) e passa-baixa (destaca estruturas retilíneas e horizontais). Neste sentido, um procedimento bastante conhecido é a migração ou deconvolução espacial. Nesta, a forma e disposição geométrica aproximada dos refletores é reconstituída (Borges & Porsani, 2002), por meio de um ajuste iterativo da velocidade do sinal de *background*. A migração é particularmente importante por colapsar os eventos hiperbólicos, ruidosos, que resultam de eventos de difração em subsuperfície (Dentith & Mudge, 2014).

De maneira geral, as operações de processamento básico não alteram ou distorcem radicalmente as informações coletados em campo, preservando as feições originais do dado bruto (Annan, 1999).

- processamento avançado

A utilização de ferramentas avançadas de processamento está atrelada ao objetivo do trabalho, além de modificar significativamente o dado bruto. Duas técnicas bastante recorrentes, tanto na sísmica quanto em GPR, são a correção NMO (*Normal Move Out*) e o atributo de análise de traços. Outros mecanismos que se adequam a esta categoria são o filtro FK, *dip filter*, *selective muting* e as análises de velocidade aparente.

A remoção de *background* e de traços não desejados caracterizam uma técnica de processamento voltada ao destaque e realce do meio ou objeto alvo em subsuperfície, pela remoção de sinais indesejados (Annan, 1999).

- visualização e interpretação

Inicialmente, os dados são plotados em pseudo-seções 2D, que relacionam o tempo, em nanosegundos (no eixo vertical), com a distância, em metros (no eixo horizontal). As seções podem ser migradas através da correção NMO, o que resulta em seções profundidade pela distância horizontal (Figura 6.5A). Hoje, os softwares de processamento mais avançados permitem a

confecção de blocos pseudo-3D e 3D (Figura 6.5B), além de seções transversais aos dados interpolados em profundidade (Figura 6.5C) ou *time/depth slices*. Tais modelos são realizados a partir da interpolação de seções 2D paralelas, igualmente espaçadas (Jol, 2009).

A interpretação do meio em subsuperfície depende da identificação e delimitação dos principais refletores que, pós-processados, devem estar destacados em acordo com a impedância dos materiais geológicos presentes no solo. Rochas, ou solos, com mineralogias distintas tendem a apresentar uma variação “textural”, ou seja, apresentam aspecto mais ou menos rugoso, a depender do material (Dentith & Mudge, 2014).

Vale lembrar que o entruncamento de refletores e as feições hiperbólicas podem ser explicados pelo fenômeno da difração, o qual não deve ser levado em conta no momento da interpretação e que pode ser eliminado por migração (Dentith & Mudge, 2014).

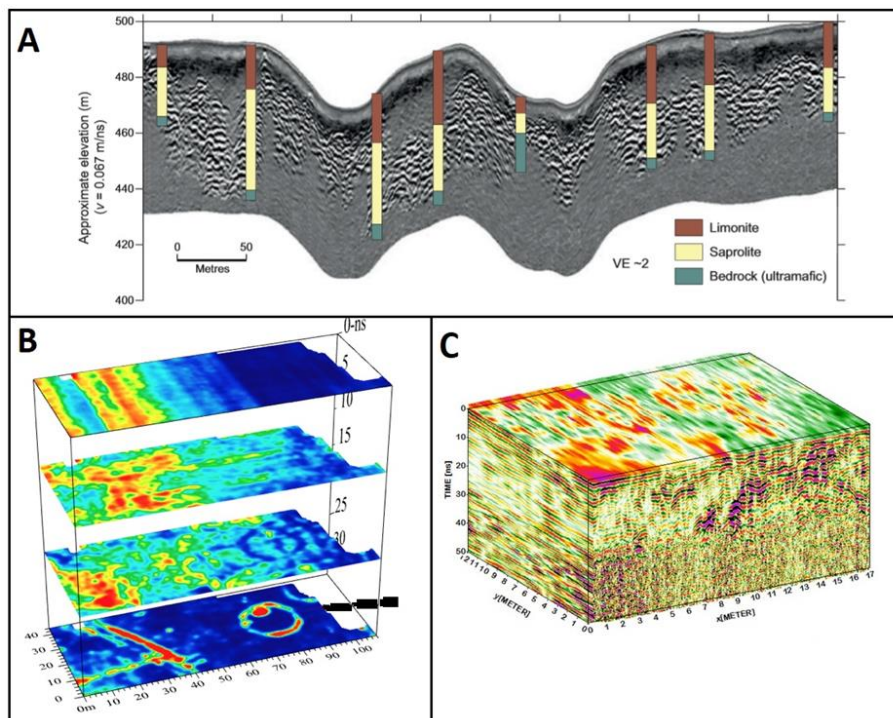


Figura 6.5. Técnicas de visualização de dados de GPR (A) Pseudoseção 2D relacionando a profundidade com a distância horizontal. No caso a interpretação foi feita com o auxílio da descrição de testemunhos de sondagem; (B) Seções horizontais ou *time slices* geradas a partir da interpolação de perfis de GPR; (C) bloco 3D gerado, também, pela interpolação de seções 2D (Dentith & Mudge, 2014; HunterGeophysics.com; Gabryś et al., 2019).

Os dados de GPR foram processados no software RadExplorer, desenvolvido pela MALA Geoscience. Foram obtidas seis seções ou radogramas, totalizando 704,5 m lineares de levantamento. Foram aplicados três filtros para aprimoramento visual – *DC Removal*, *Amplitude Correction*, *Bandpass Filtering*.

O filtro *DC Removal* foi utilizado com intuito de remoção da componente constante do sinal de GPR, no caso, a média aritmética da coleção amostral de dados para o intervalo de tempo entre 84 e 104 segundos, conforme parametrizado no menu *module parameters*. O filtro *Amplitude Correction* foi ajustado à função *automatic gain control*, a qual equaliza e amplifica a amplitude do sinal ao longo de todos os traços da janela.

O *Bandpass Filtering* (Figura 6.6) foi usado para aumentar a razão sinal/ruído, uma vez que o algoritmo, que opera no domínio da frequência, aplica a transformada de Fourier no espectro de amplitudes do filtro. Por fim, foi realizada a correção altimétrica de seção, manualmente, através do menu *Topography*, utilizando-se dos dados de GNSS.

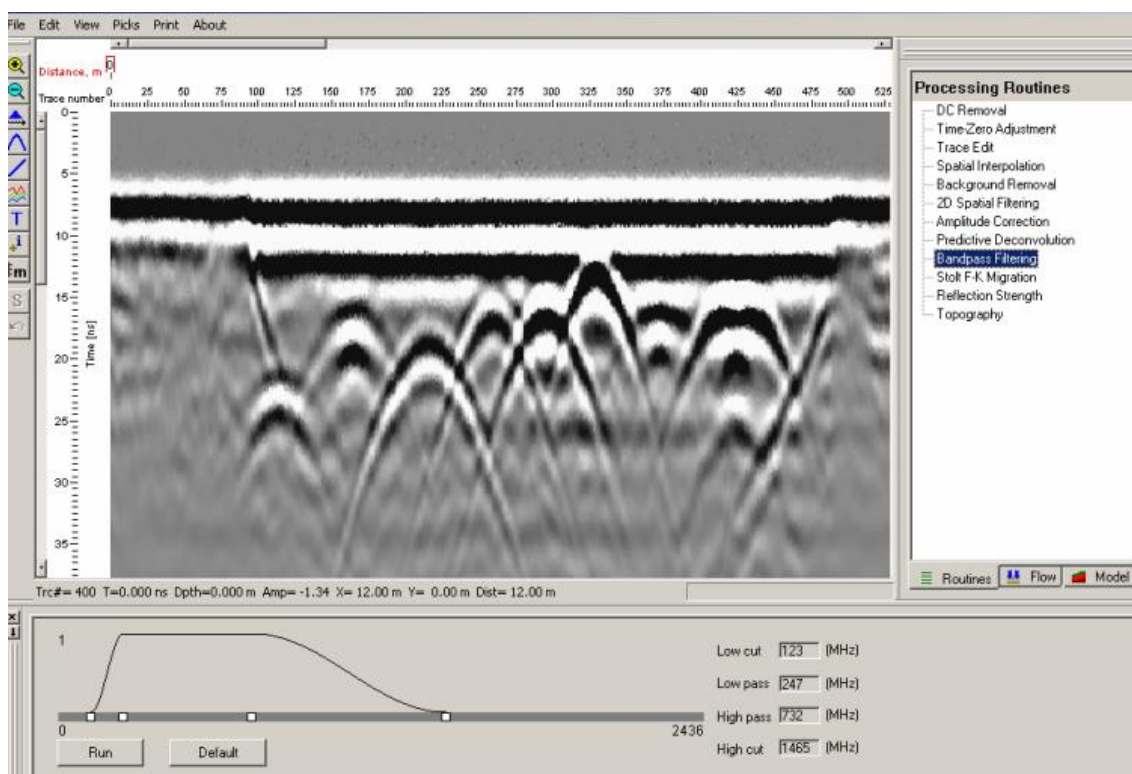


Figura 6.6. Interface do software RadExplorer, da MALA Geoscience, mostrando a função bandpass filtering em dados de GPR.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do processamento dos dados de ERT, IP e GPR foram confeccionadas 21 seções bidimensionais de resistividade elétrica, outras 21 seções de polarização induzida e 6 seções de GPR. O nível freático do maciço e ombreiras da barragem, verificados através de leituras piezométricas no período da aquisição dos dados, foi indicado em cada uma das seções. Também foram gerados mapas, em ambiente GIS, referenciando o posicionamento de piezômetros, medidores de nível e os locais exatos em que foram realizados os ensaios geofísicos.

A equipe de engenharia responsável pela inspeção e manutenção da barragem forneceu dados de piezometria, pluviometria e vazão, além de relatórios de inspeção, sem os quais não seria possível realizar a correta interpretação dos dados.

No software EarthImager 2D, foram feitos modelos tridimensionais de ERT, a partir das seções bidimensionais, além do *timelapse* entre as aquisições coletadas nas campanhas de outubro de 2019 e março de 2020. A utilização desta técnica de processamento permitiu analisar comparativamente o desempenho hidráulico no interior barragem entre inverno e verão, tendo em vista a variação no regime de chuvas de uma estação à outra.

É importante aqui salientar que a primeira campanha (outubro de 2019) está aqui subdividida em dois períodos de aquisição de dados, denominados como *Etapa 1* (B1 e B2). A segunda campanha (março de 2020), foi denominada como *Etapa 2*:

- **Etapa1_B1** (08/10 – 14/10/2019).
- **Etapa 1_B2** (14/10 – 18/10/2019).
- **Etapa 2** (06/03 – 09/03/2020).

As seções invertidas de ERT, cargabilidade e radagramas GPR, para as etapas definidas acima, são apresentadas em anexo, ao final da dissertação.

As interpretações foram desmembradas nas seções correspondentes às linhas de ERT e IP, ou seja, L1, L2, ..., L7 (Figura 7.1). Desta forma, cada parte do maciço de barragem foi cuidadosamente analisada e discutida. Os dados de GPR foram discutidos separadamente, no último item deste capítulo, de forma a reforçar certas particularidades estruturais do maciço.

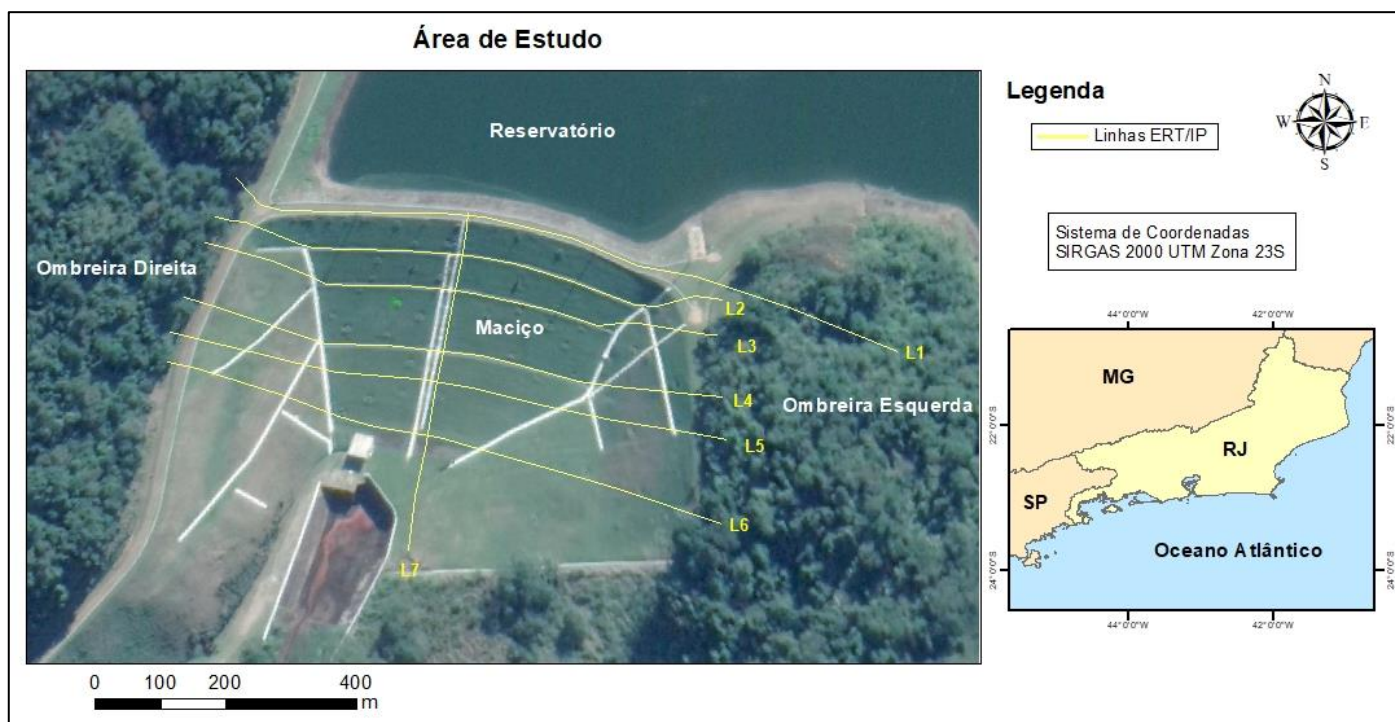


Figura 7.1. Mapa da barragem, exibindo seus principais compartimentos (ombreiras, maciço e reservatório), além do posicionamento das linhas de ERT e IP, em amarelo.

Os itens a seguir discutem as seções de ERT, IP (cargabilidade), geradas na segunda campanha (março/2020) de campo, uma vez que esta corresponde ao período de maior precipitação na área de estudo. Os dados de piezometria foram plotados junto aos dados geofísicos, indicando a variação do nível freático em cada porção do maciço.

7.1 Análise da Seção L1 (Crista)

A crista da barragem exibe uma feição de baixa resistividade ($800 \Omega.m$) e cargabilidade*resistividade ($8.5E+05 \text{ mV/V}*\Omega.m$), imediatamente abaixo da ombreira esquerda, à distância de 170 m do início da linha. A geometria desta zona é representada por uma descontinuidade elétrica, a qual interpretamos

como uma possível zona de fratura, que estaria interceptando a fundação, condutiva, da ombreira (Figura 7.2A). Valores reduzidos de cargabilidade (Figura 7.2B), aliados à baixa resistividade, poderiam indicar a percolação de soluções eletrolíticas da superfície até a fundação, através da descontinuidade. Existe, contudo, a possibilidade desta mesma área estar relacionada a região de contato entre horizontes de rocha e/ou solos de natureza composicional e geológica distintas.

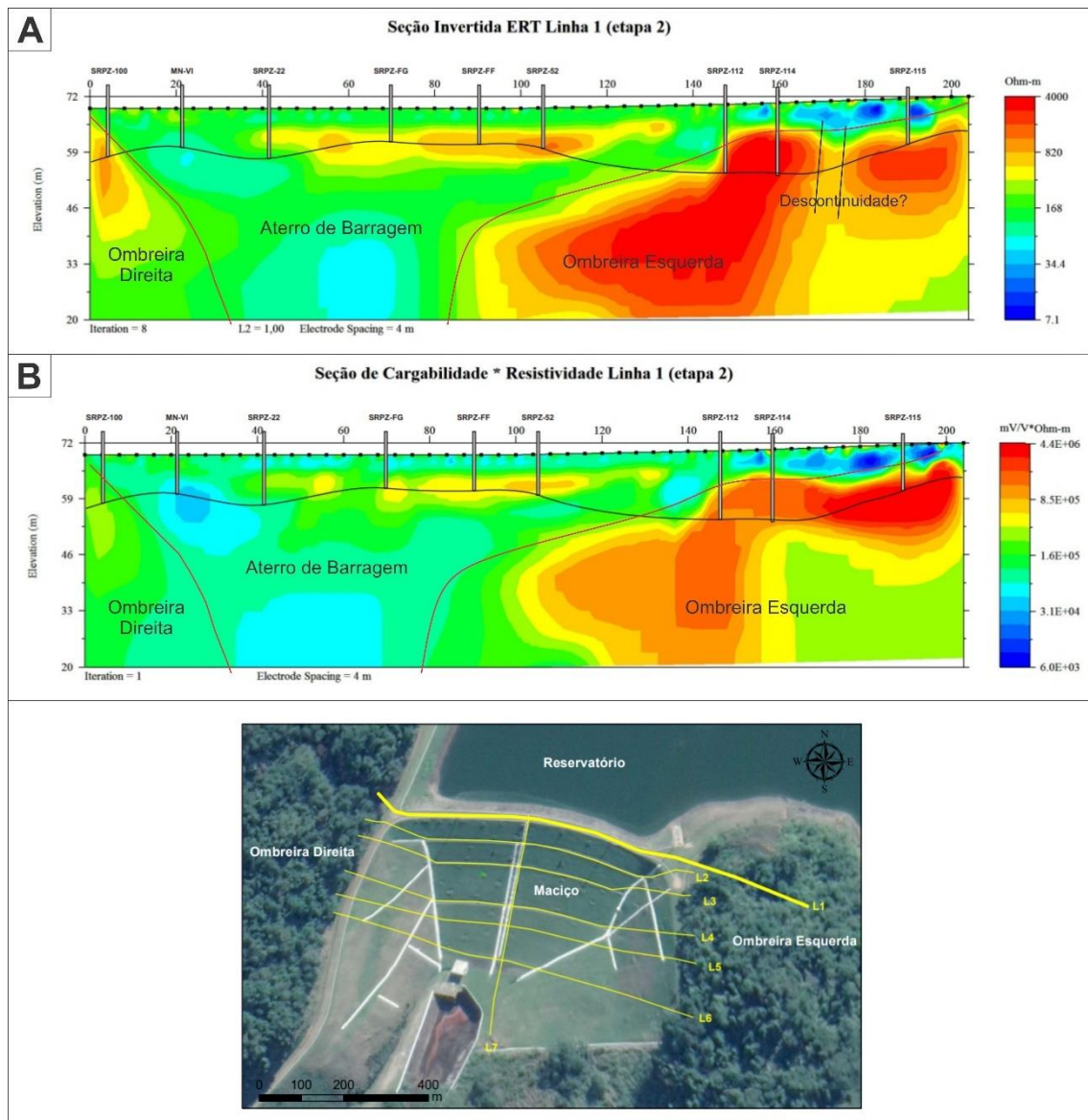


Figura 7.2. (A) Seção ERT da crista, exibindo possível zona de fratura (descontinuidade); (B) Seção de cargabilidade da crista da barragem. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

É possível observar que o aterro do maciço de barragem ocupa pouco espaço nesta seção, se comparado as ombreiras, afinal a crista está posicionada na porção mais estreita (estrangulamento) do canal. O solo empregado na consolidação da barragem assume a geometria de “V”, afunilando do topo à base, devido à maior constrição geomorfológica do maciço rochoso no local. Ainda é possível identificar maior declividade da ombreira direita, que apresenta contato verticalizado com o solo do aterro, ao passo que a ombreira oposta (esquerda), é menos íngreme e prolonga-se em direção ao centro da barragem, fornecendo suporte à estrutura.

Quando aplicado o diferencial entre as etapas 1 e 2, através do método de time-lapse, não foram identificadas alterações significativas ou preocupantes, ou seja, com relação a estruturação interna e desempenho hidráulico, a crista da barragem se manteve a mesma (Figura 7.3). Foi identificado, contudo, aumento da resistividade sobre uma pequena parte da ombreira esquerda, o que pouco influenciaria em seu bom funcionamento. Em termos gerais, a estrutura mostra-se estável no decorrer dos meses de outubro/2019 a março/2020, apesar da variação das chuvas.

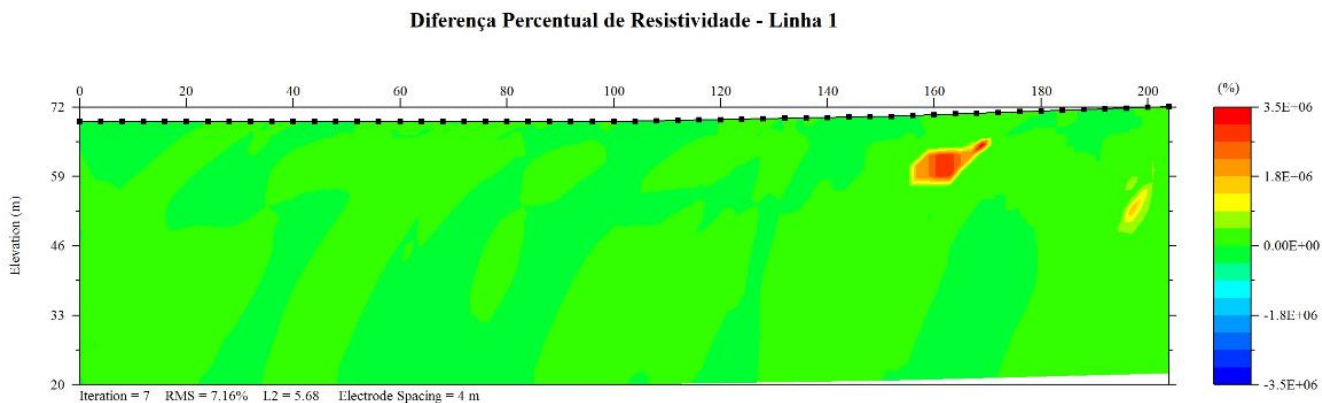


Figura 7.3. Time-lapse da seção 1 (crista), exibindo pouca variação percentual em valores de resistividade entre os meses de outubro/2019 e março/2020.

Ademais, os piezômetros aparentam exibir variações coerentes com as anomalias de condutividade, na crista, o que sugere boa manutenção dos instrumentos geotécnicos.

7.2 Análise da Seção L2

A análise da seção 2, com base nos parâmetros de resistividade e cargabilidade, revelou a presença de um aterro bastante homogêneo, com conteúdo significativo de solo argiloso muito condutivo, com valores próximos a 150 Ω .m (Figura 7.4A), destacado, na seção de ERT, na cor azul. A ombreira esquerda, bastante resistiva (valores próximos a 1.000 Ω .m) e de cor vermelha, contrasta com a porção central do maciço. Foram identificadas regiões com suposta saturação em fluido através da análise de polarização induzida, na qual foram detectados halos de baixa cargabilidade (valores na ordem de 7.000 mV/V Ω .m) contidos no interior da porção condutiva do maciço (Figura 7.4B). O observado pode estar associado à presença de solução eletrolítica percolando por dentre espaços vazios no interior do maciço ou, ainda, a regiões de acúmulo de água e saturação do solo.

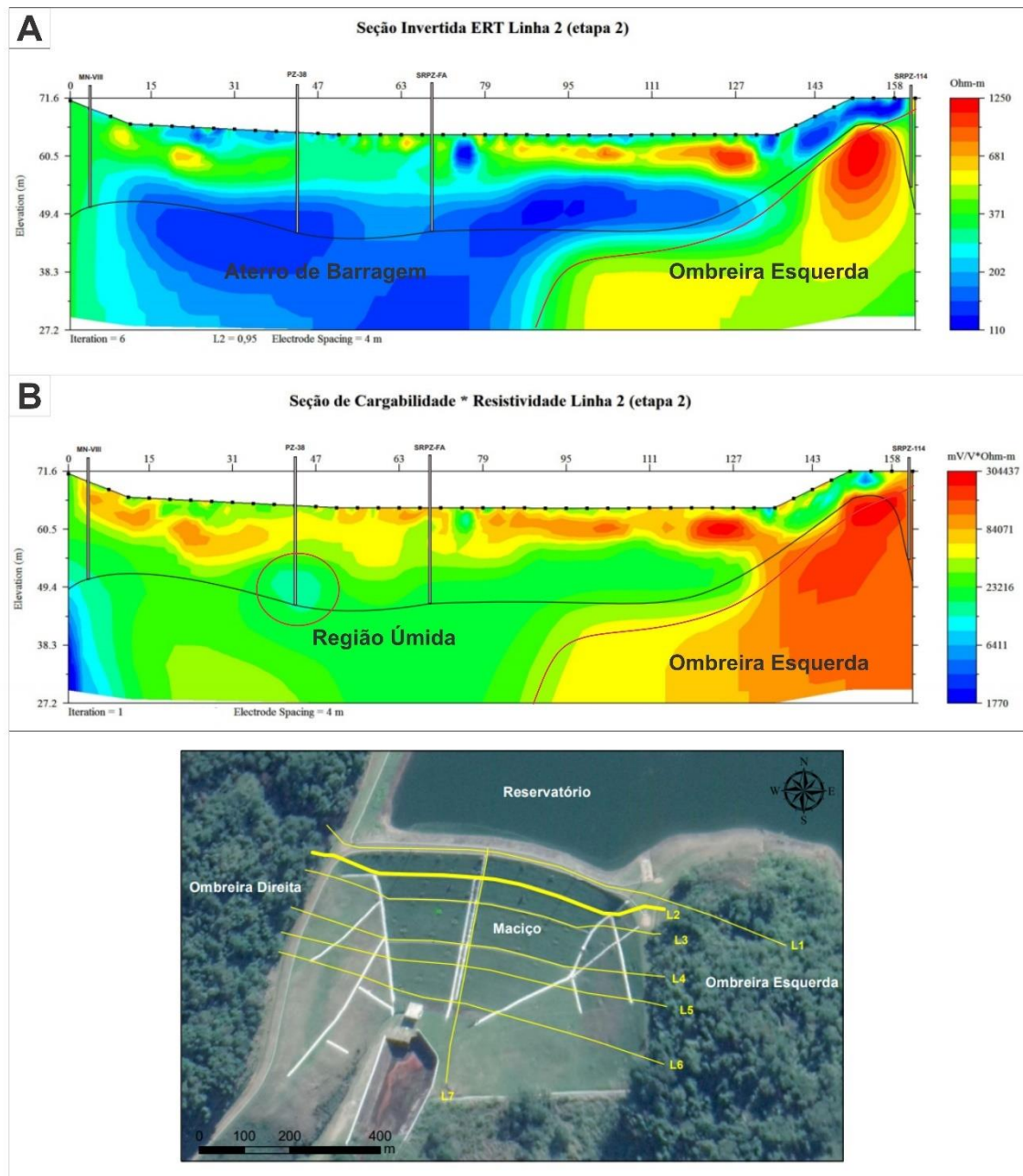


Figura 7.4. (A) Seção ERT da linha 2, exibindo o aterro de barragem e parte da ombreira esquerda do maciço; (B) Seção de cargabilidade da linha 2, mostrando provável região de saturação em água, na porção central do dique. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

Interpreta-se aqui que a seção L2 intercepta o filtro vertical da barragem, estrutura, esta, responsável pela coleta e dissipação de parte da água infiltrante do reservatório, à montante, razão pela qual os valores de resistividade são tão baixos nesta porção, no caso da ordem de 100 a 200 Ω .m. Os valores médios de resistividade tendem a crescer a partir da seção L3, o que reforça a ideia de

que a presente seção estaria interceptando o filtro. Também foram caracterizadas na cor azul (na seção de ERT) as estruturas de concreto superficiais do maciço (escadas e calhas), as quais não devem ser confundidas com zonas anormalmente condutivas.

Na análise de time-lapse, assim como na seção relativa à crista, não foram detectadas zonas de aumento de condutividade (Figura 7.5). Os valores médios de percentual de variação de resistividade sugerem que o maciço se manteve intacto e pouco susceptível à variação da precipitação.

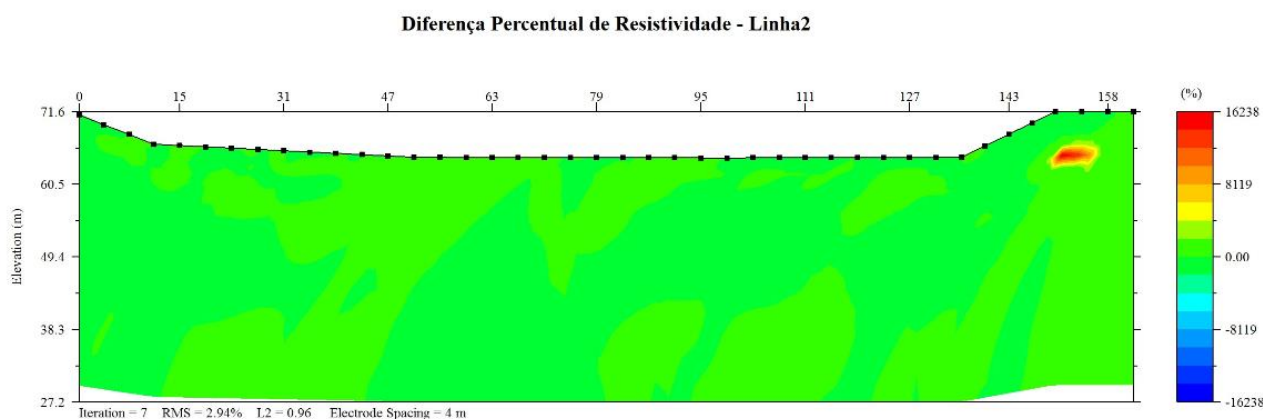


Figura 7.5. Time-lapse da seção 2, exibindo pouca variação percentual em valores de resistividade entre os meses de outubro/2019 e março/2020.

7.3 Análise da Seção L3

A análise da seção L3 revela um aterro ainda condutivo, porém menos em relação à L2. Uma anomalia de mais alta resistividade e direção horizontal, com valores próximos a $400 \Omega.m$, aparenta cruzar a estrutura, de ombreira a ombreira, na profundidade de 48 m, aproximadamente (Figura 7.6A). Interpretamos tal feição como sendo um diafragma plástico ou alguma outra solução de engenharia utilizada para impermeabilizar a região da barragem. De fato, com base na análise de polarização induzida (Figura 7.6B), a estrutura aparenta ter garantido maior estanqueidade ao maciço, devido a altos valores de cargabilidade, próximos a $50.000 \text{ mV/V} \cdot \Omega.m$.

Acima do suposto diáfagma plástico parece haver algum acúmulo de solo saturado em água, o que é corroborado por anomalias de mais alta condutividade na porção central do maciço, em especial em profundidades mais rasas, próximas a 5 m.

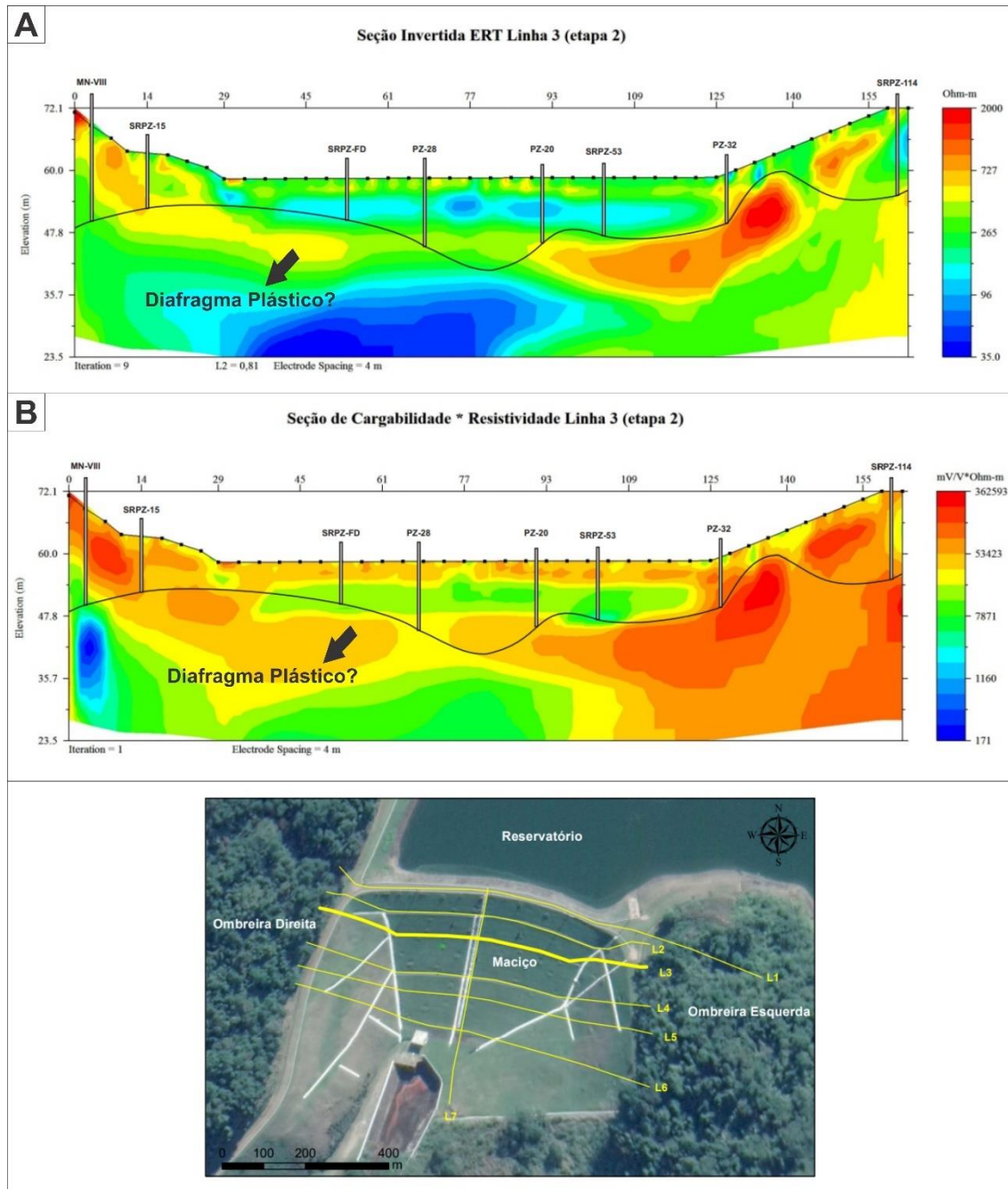


Figura 7.6. (A) Seção ERT da linha 3, dispondo o solo (em cor azul) condutivo, empregado na consolidação do maciço. A feição resistiva, indicada pela seta, poderia corresponder a um diáfagma plástico, uma solução de engenharia comum em barragens de terra; (B) Seção de cargabilidade na linha L3. Valores mais elevados de tal parâmetro no local que, supostamente,

corresponde ao diafragma, destacam a estanqueidade da estrutura nesta porção. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

A análise de time-lapse, neste caso, resultou em alguns altos de condutividade, em especial em ambas as ombreiras, o que não poderia ser observado apenas com base nas seções 2D de ERT e IP. É possível que a constância das chuvas de verão e subida do nível do reservatório tenham contribuído para maior percolação de água por dentro o maciço rochoso e solo coluvionar sobre o qual a barragem está sustentada.

A figura a seguir ilustra, na cor azul, as regiões em que, no mês de março, o solo tornou-se mais condutivo (Figura 7.7).

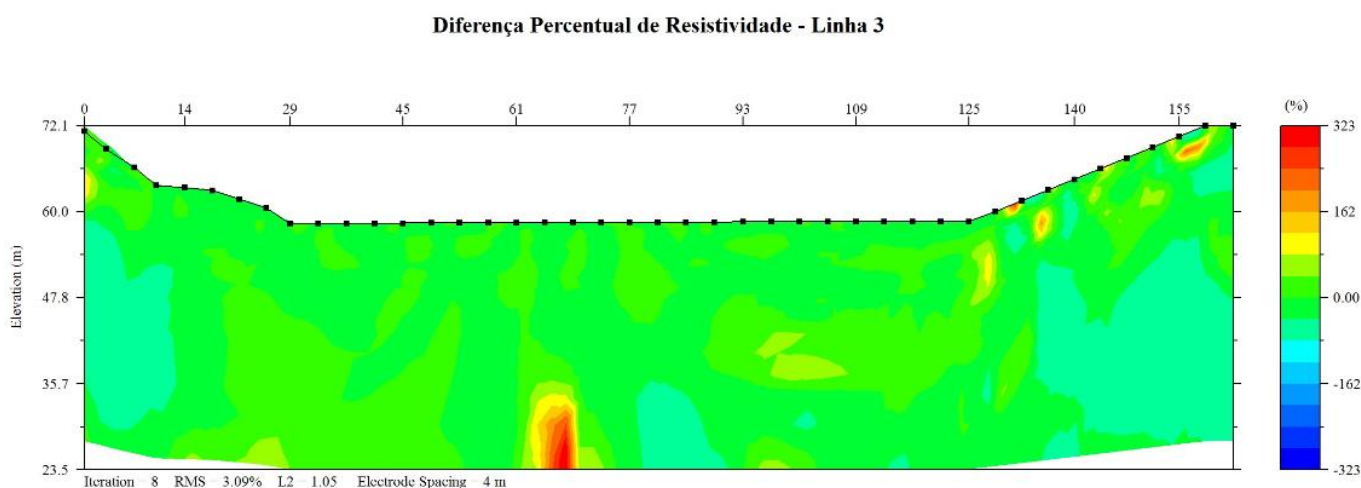


Figura 7.7. Seção time-lapse da linha L3, exibindo alta de condutividade nas regiões indicadas e, principalmente, nas ombreiras.

As feições apresentadas na cor azul indicam aumento de condutividade significativo nas ombreiras e base (fundação) da barragem. Também está presente uma feição de aumento de resistividade, nas cores vermelho e amarelo, que por ocorrer em profundidade, não é preocupante.

7.4 Análise da Seção L4

A análise da linha L4, revela um importante contraste entre ombreiras e aterro. Nesta seção, as ombreiras parecem se prolongar para dentro do aterro, exibindo uma geometria difusa, provavelmente associada a presença de

diferentes horizontes de solo e rocha dispostos em meio à matriz do solo coluvionar. Com base na análise de polarização induzida e alturas piezométricas, uma zona de alta cargabilidade e condutividade (valores próximos a $50 \Omega.m$ e $10.000 \text{ mV/V} \cdot \Omega.m$) foi identificada no centro do maciço de barragem, a qual poderia remeter a um solo saturado em água (Figura 7.8A e B).

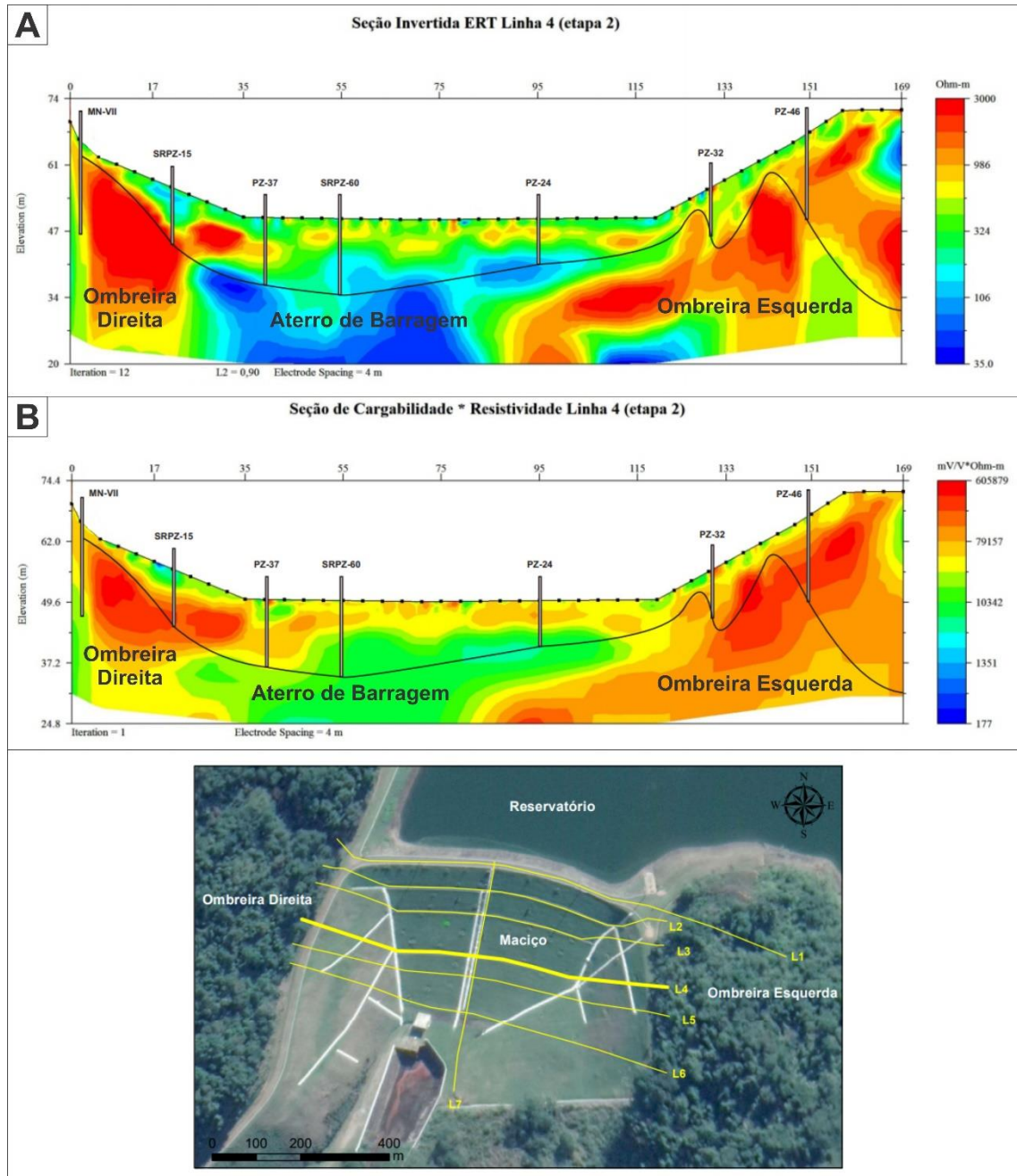


Figura 7.8. (A) Seção ERT da linha L4, ilustrando significativa diferença de resistividade entre ombreiras e aterro; (B) Seção de cargabilidade na Linha L4, dispondo de valores elevados de condutividade no centro do aterro, o que sugere saturação do solo. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

A análise por time-lapse não revelou zonas de aumento de condutividade, apenas acréscimo de resistividade imediatamente sob a ombreira direita, o que não comprometeria a integridade nesta parte da barragem (Figura 7.9). A seção mostra-se bastante homogênea, e com percentual médio de variação de resistividade próximo a zero.

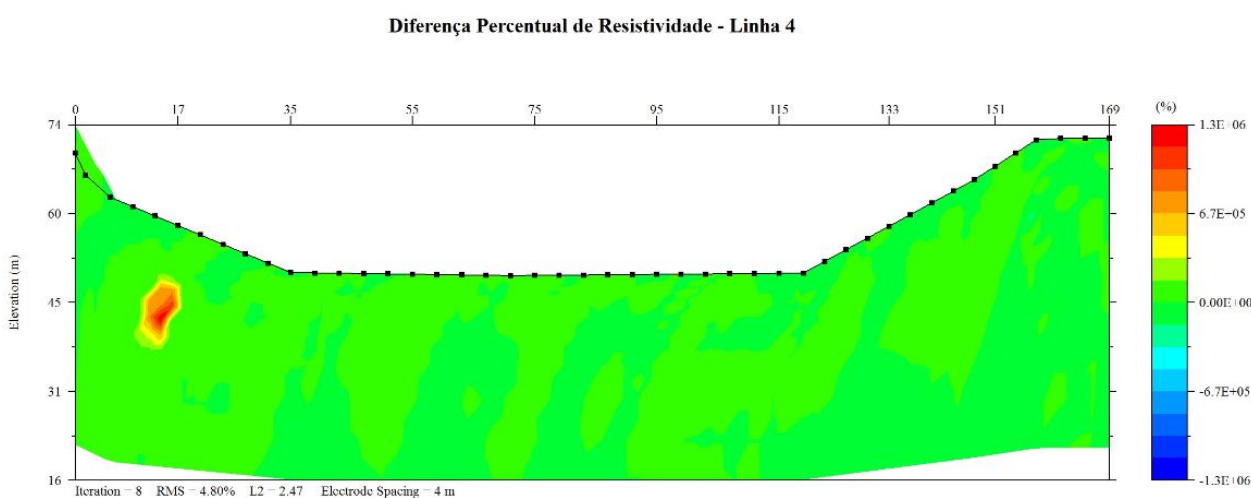


Figura 7.9. Seção time-lapse correspondente à linha 4, exibindo pouca variação percentual de resistividade ao longo do maciço e ombreiras.

7.5 Análise da Seção L5

A análise da seção L5 mostra um maciço, em geral, mais resistivo, uma vez que, em relação às seções superiores, a presença do aterro (condutivo) é reduzida na base da barragem. Portanto, neste caso, predomina a cobertura rochosa e pedogenética pertencente às ombreiras, além dos elementos da fundação. O mesmo se aplica a seção seguinte, L6.

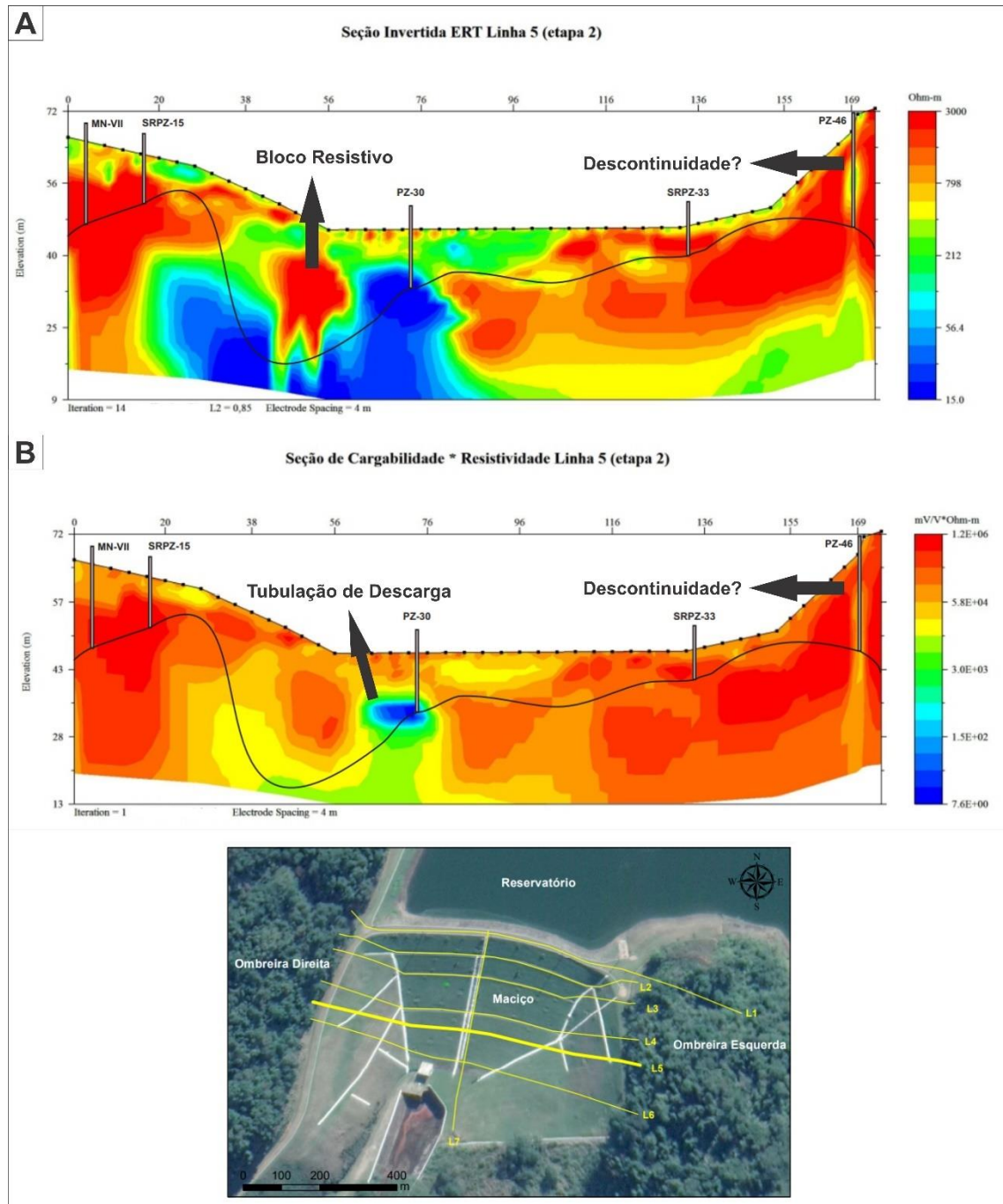


Figura 7.10. (A) Seção ERT da linha L5, ilustrando um bloco de elevada resistividade em meio ao aterro central e uma descontinuidade, coincidente com o piezômetro PZ-46, na ombreira esquerda; (B) Seção de cargabilidade na Linha L5, exibindo a tubulação de descarga da barragem, além da descontinuidade na ombreira esquerda. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

No caso de L5, é possível observar, próximo à base da ombreira direita, um bloco bastante resistivo, com valores próximos a 3.000 Ω .m, que intercepta

o aterro homogêneo e está fincado sobre a fundação (Figura 7.10A). Este, poderia estar associado a uma estrutura de concreto ou solo menos argiloso e impermeável. A direita deste, identifica-se uma feição de geometria circular e elevada condutividade ($15 \Omega.m$) e baixa cargabilidade ($1.5E+02 \text{ mV/V}^* \Omega.m$), que pode estar ligada a tubulação de descarga da barragem (Figura 7.10B). Tal estrutura é apenas utilizada em casos em que o nível do reservatório é crítico e existe a possibilidade de *overtopping*, ou seja, a altura do reservatório supera o limite de segurança estipulado e ameaça erodir a crista.

Nas figuras presentes no painel seguinte, ainda está indicada, na ombreira esquerda, uma suposta descontinuidade (fratura), que coincide com a posição do piezômetro PZ-46. A sondagem realizada para instalação do instrumento possivelmente teria deixado uma cicatriz no interior da ombreira, resultando em uma estrutura verticalizada com valores de resistividade próximos a $600 \Omega.m$.

Assim como na seção anterior, a análise por time-lapse não revelou regiões de importante variação de resistividade (Figura 7.11).

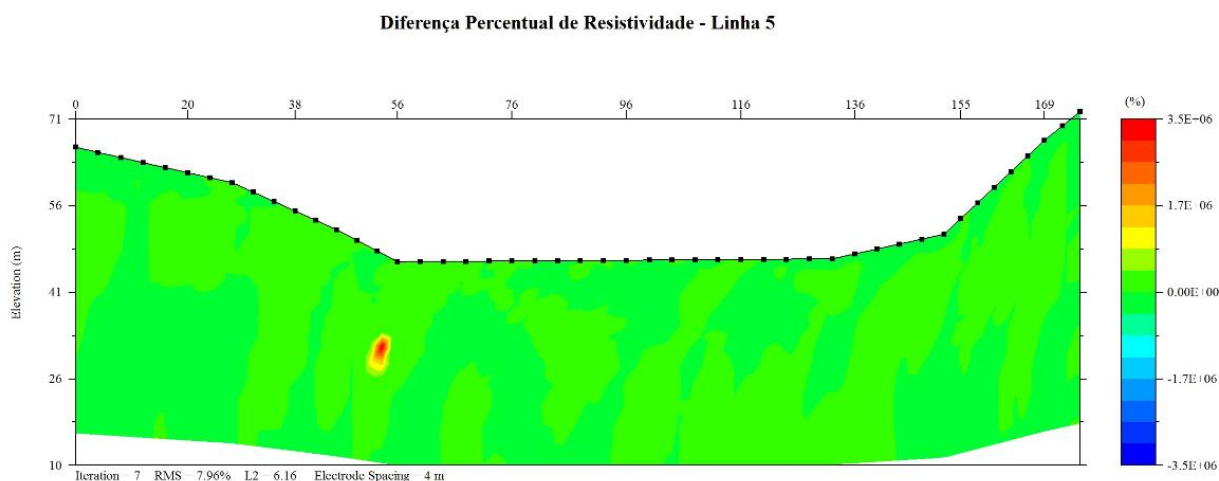


Figura 7.11. Seção time-lapse correspondente a linha 5, a qual não revelou variações percentuais consideráveis de resistividade.

7.6 Análise da Seção L6

Na seção relativa à linha L6, a análise das feições de ERT e IP, revelou, assim como na L5, a presença do duto de descarga da barragem, acionado em casos de cheia do reservatório. A feição está posicionada na parte central da barragem, cerca de 5 m sob a superfície do maciço. Ademais, a seção mostra-se, em geral, mais resistiva, uma vez que as aquisições geofísicas foram realizadas imediatamente acima do enrocamento ou *rip-rap* de jusante, que está posicionado no pé do talude de barragem e é constituído por blocos superpostos de gnaiss e granito.

Em direção às ombreiras, a elevada resistividade do terreno (valores próximos a 3.000 Ω .m) revela a predominância das ombreiras, em detrimento do aterro de solo artificial, pouco presente nesta cota altimétrica. A seção de cargabilidade identificou o que aparenta ser o duto de captação de água, que cruza do talude nas imediações da ombreira direita (Figura 7.12B). A análise de resistividade revelou algumas feições de formato circular e baixa resistividade (Figura 7.12A), com valores próximos a 200 Ω .m, e que poderiam corresponder a cavidades erodidas preenchidas por material aquoso ou, ainda, drenos internos, na base da estrutura.

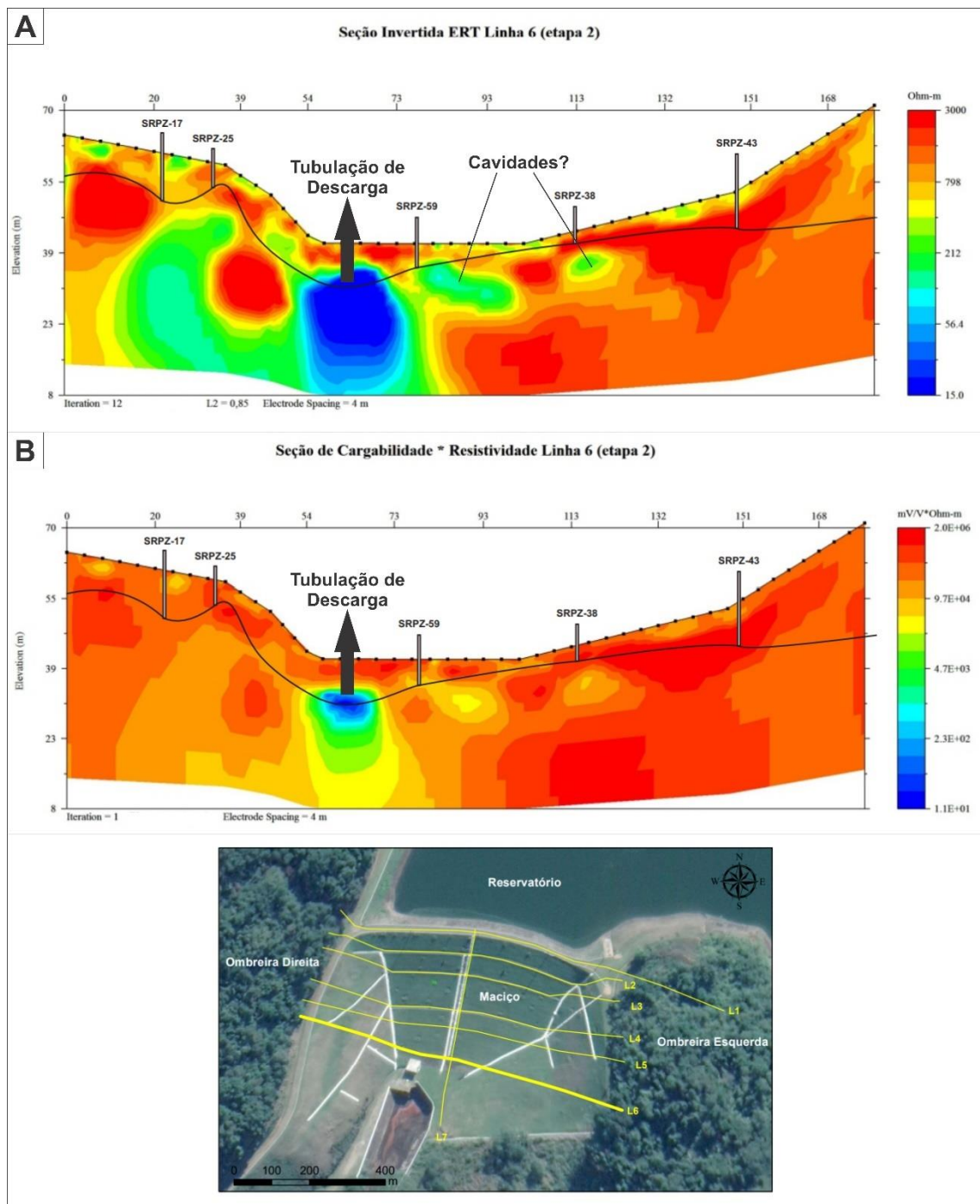


Figura 7.12. (A) Seção de resistividade da linha L6, exibindo o duto central de descarga de cheias, além de feições circulares que se assemelham a erosões preenchidas por material aquoso, mas que podem, também, corresponder a drenos; (B) Seção de cargabilidade da linha L6, exibindo os dutos de captação de água e de descarga de cheias. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

A seção de time-lapse mostrou feições de aumento de resistividade, em especial na porção central do maciço de barragem, a cerca de 20 m da

superfície, as quais sugerem que a fundação da estrutura permaneceu impermeável no decorrer dos meses (Figura 7.13). Não foram detectadas zonas de aumento de condutividade elétrica.

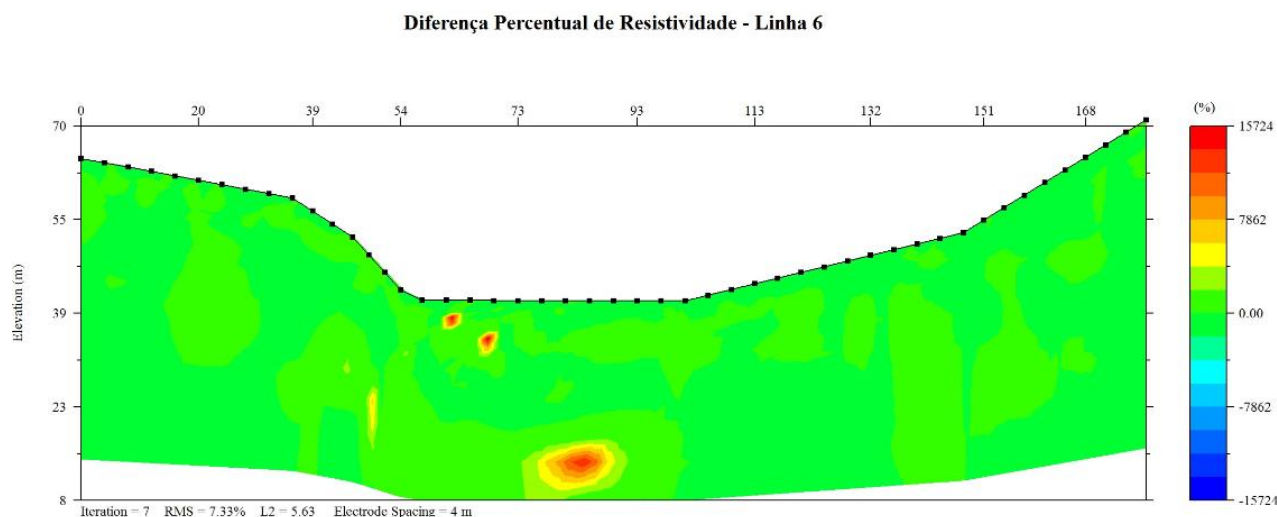


Figura 7.13. Seção time-lapse relativa à linha L6. Não foram identificadas feições de aumento percentual de condutividade, o que mostra boa estanqueidade da estrutura no decorrer dos meses. Ao contrário, a seção mostra-se mais resistiva, em especial, na fundação da barragem, conforme mostra a anomalia central de cor amarela e vermelha.

7.7 Análise da Seção L7 (Transversal)

A análise da seção transversal exhibe todas as feições geoeletricas, de crista a jusante, na porção central do aterro. É possível visualizar uma pluma de material fluido que se prolonga a partir do topo da crista em direção ao centro do maciço, formando uma zona de material, solo, saturado em água. A partir do piezômetro SRPZ-FA ocorre rebaixamento desta zona, possivelmente devido a presença de um filtro vertical (Figura 7.14A).

Neste caso, o aterro se divide em duas regiões. A porção mais úmida e condutiva, com valores próximos a $50 \Omega.m$, ocorre abaixo da linha de altura piezométrica, enquanto a parte seca e resistiva (valores próximos a 800Ω) ocorre acima da mesma. O aterro mostra-se condutivo, em geral, devido a presença de material argiloso homogêneo. A saturação em água é identificável através da seção de IP, na qual zonas de baixa cargabilidade (25.000 mV/V^*

$\Omega.m$) denotam a presença de soluções eletrolíticas, neste caso, a mistura de solo argiloso e água. Tal fenômeno é observável no topo da crista e na base do maciço (Figura 7.14B).

Na base da barragem, ocorre uma feição de formato trapezoidal e com valores bastante altos de resistividade (900 $\Omega.m$). Esta seria a ensecadeira, a partir da qual a estrutura não mais estaria saturada em água. Ainda é possível observar, nesta mesma região, o enrocamento (resistivo) que ocorre no pé do talude de jusante.

As feições geoeletricas observadas nesta seção apresentam similaridade ao parâmetro de jusante da seção esquemática transversal ao coroamento da barragem (Figura 4.2A), que dispõe do filtro vertical, ensecadeiras e elementos básicos da fundação, o que comprovaria a viabilidade dos métodos elétricos.

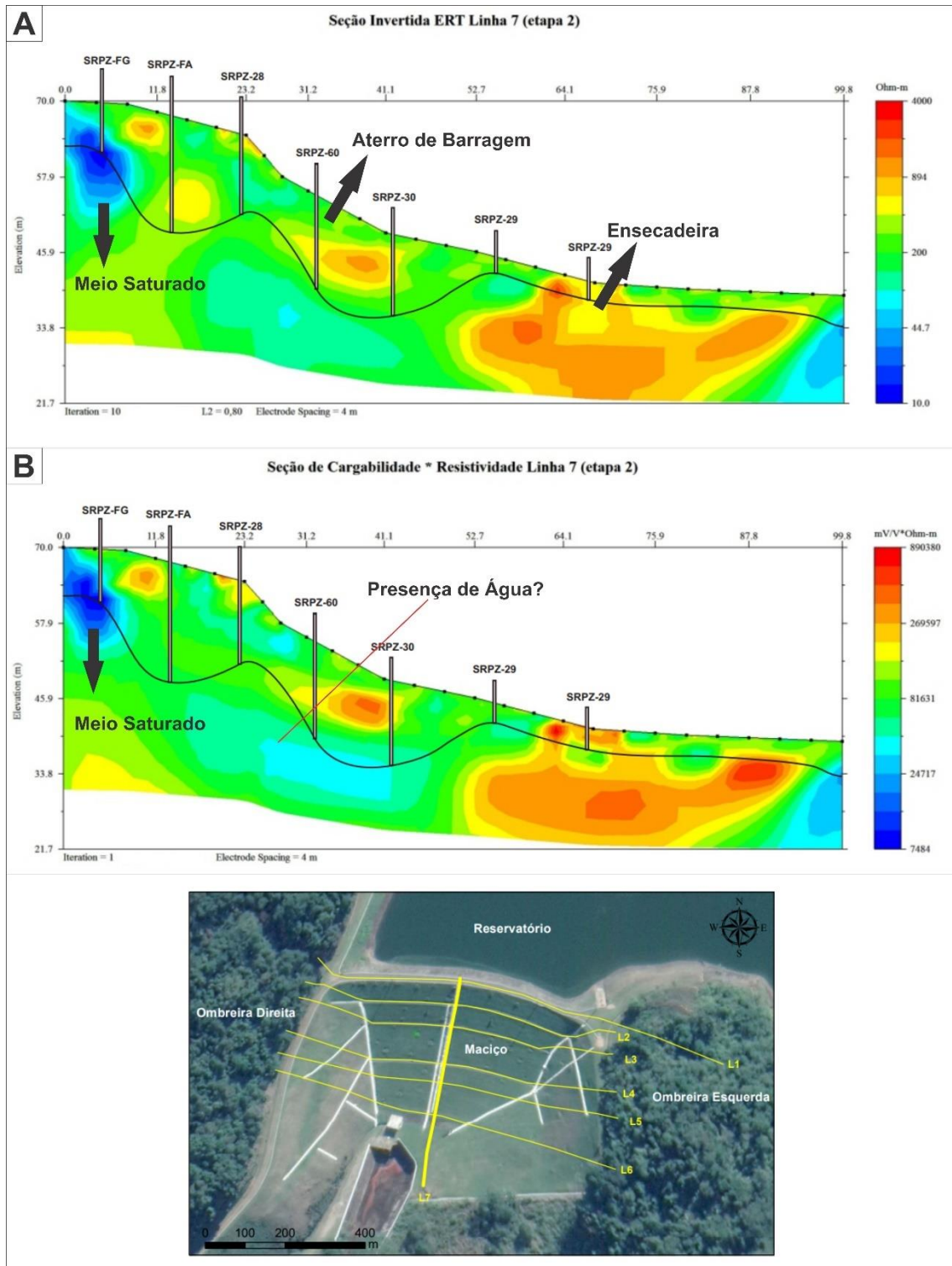


Figura 7.14. (A) Seção de resistividade da linha L7 (transversal). É possível identificar a pluma de material condutivo de propagando a partir da crista e rebaixando em direção à jusante. Também está delimitada a estrutura relativa à ensecadeira da barragem; (B) Seção de cargabilidade da linha L7. As regiões saturadas ocorrem abaixo do nível piezométrico e estão destacadas nas cores azul e verde. Os piezômetros e o nível freático da barragem (linha escura) estão dispostos junto às seções.

A seção de time-lapse não revelou aumento significativo de condutividade. No entanto, foram destacadas as regiões relativas ao enrocamento do pé de jusante e a ensecadeira, sobre a fundação (Figura 7.15). O restante do solo aparenta não ter se alterado no decorrer dos meses de outubro de 2019 a março de 2020.

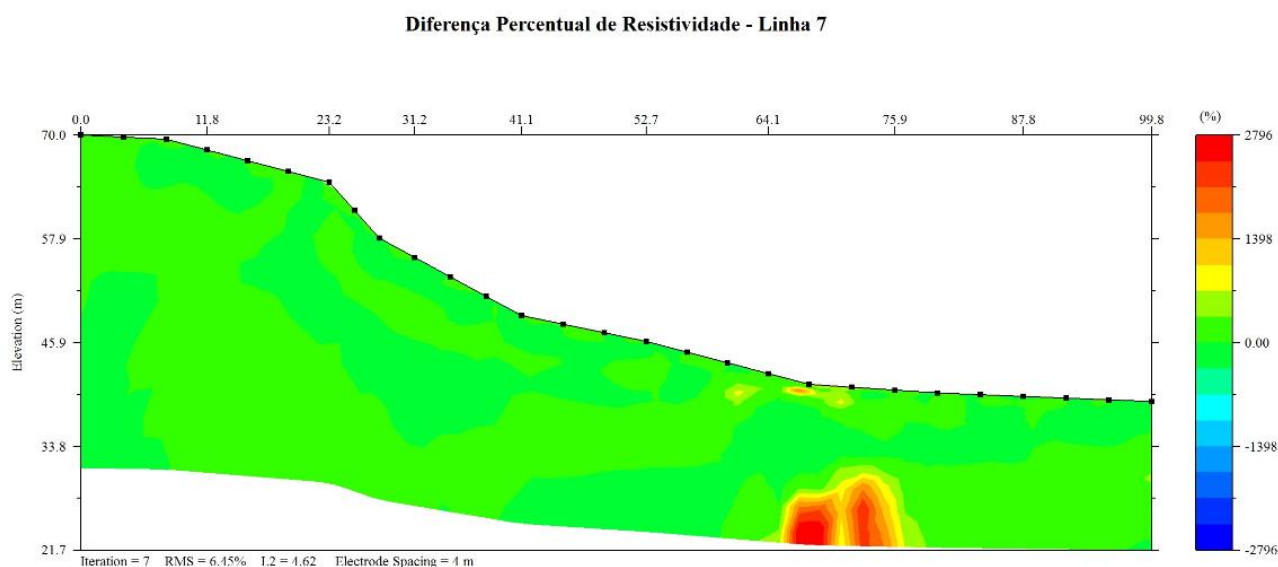


Figura 7.15. Seção de time-lapse relativa à linha L7 (transversal). É possível identificar feições de aumento percentual de resistividade, relacionadas ao enrocamento no pé do talude e à ensecadeira, sobre a fundação da barragem.

No software EarthImager 3D, foram confeccionados blocos tridimensionais de resistividade elétrica, tanto para o mês de outubro de 2019 (Figura 7.16), quanto para março de 2020 (Figura 7.17). Estes foram elaborados a partir das seis seções 2D, paralelas à crista da barragem. Os dados de resistividade faltantes foram interpolados na inversão e, portanto, podem apresentar alguma discrepância em relação a distribuição geológica real da área.

Bloco de Resistividade Outubro/2019

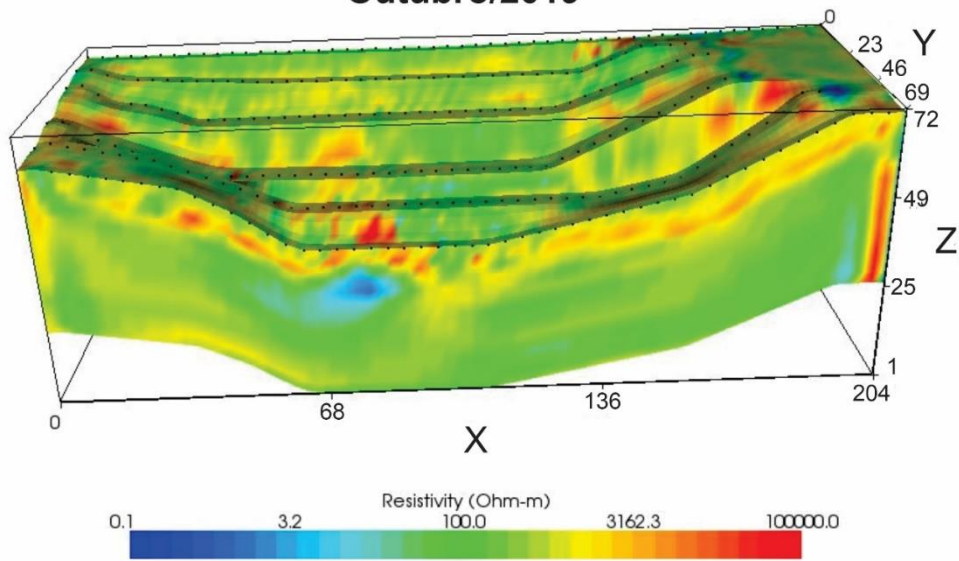


Figura 7.16. Bloco 3D de resistividade elétrica, obtido no software EarthImager 3D, a partir da interpolação de seis seções 2D paralelas, com relação ao mês de outubro/2019, primeira aquisição.

Bloco de Resistividade Março/2020

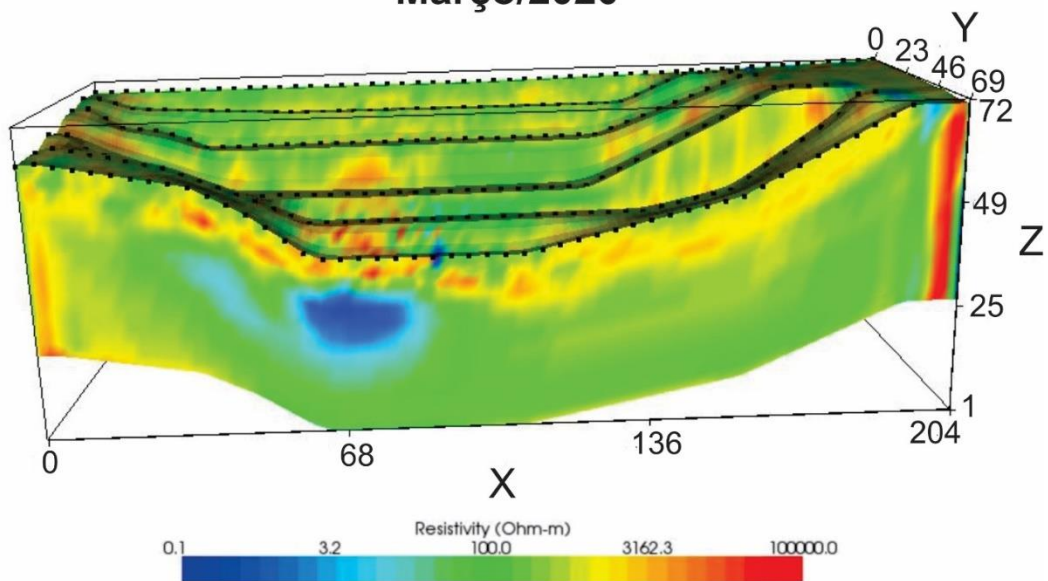


Figura 7.17. Bloco 3D de resistividade elétrica, obtido no software EarthImager 3D, a partir da interpolação de seis seções 2D paralelas, com relação ao mês de março/2020.

Apesar da similaridade entre as seções, é possível observar que as zonas condutivas mostram-se mais proeminentes no bloco de resistividade relativo ao mês de março de 2020. A constância das chuvas durante o verão pode estar associada a tal padrão. Além disso, observa-se um aumento geral de condutividade na ombreira esquerda, na região de transição entre o maciço rochoso e o aterro da barragem, em especial, na seção da Figura 7.17, à distância de 200 metros.

7.8 Análise dos radogramas de GPR

A análise dos radogramas a seguir foi realizada de forma qualitativa, com base na interpretação das geometrias presentes em cada seção, na profundidade de alcance do sinal e presença de padrões de interferência ou ausência de sinal (Figura 7.19). O alcance do sinal eletromagnético, em subsuperfície, variou de 5 a 10 metros, aproximadamente, sendo possível identificar o solo compactado do maciço de barragem, a atitude de mergulho da ombreira esquerda, um duto de descarga, piezômetros e calhas de escoamento superficial de água.



Figura 7.18. Mapa da barragem, exibindo seus principais compartimentos (ombreiras, maciço e reservatório), além do posicionamento das linhas de GPR, em azul.

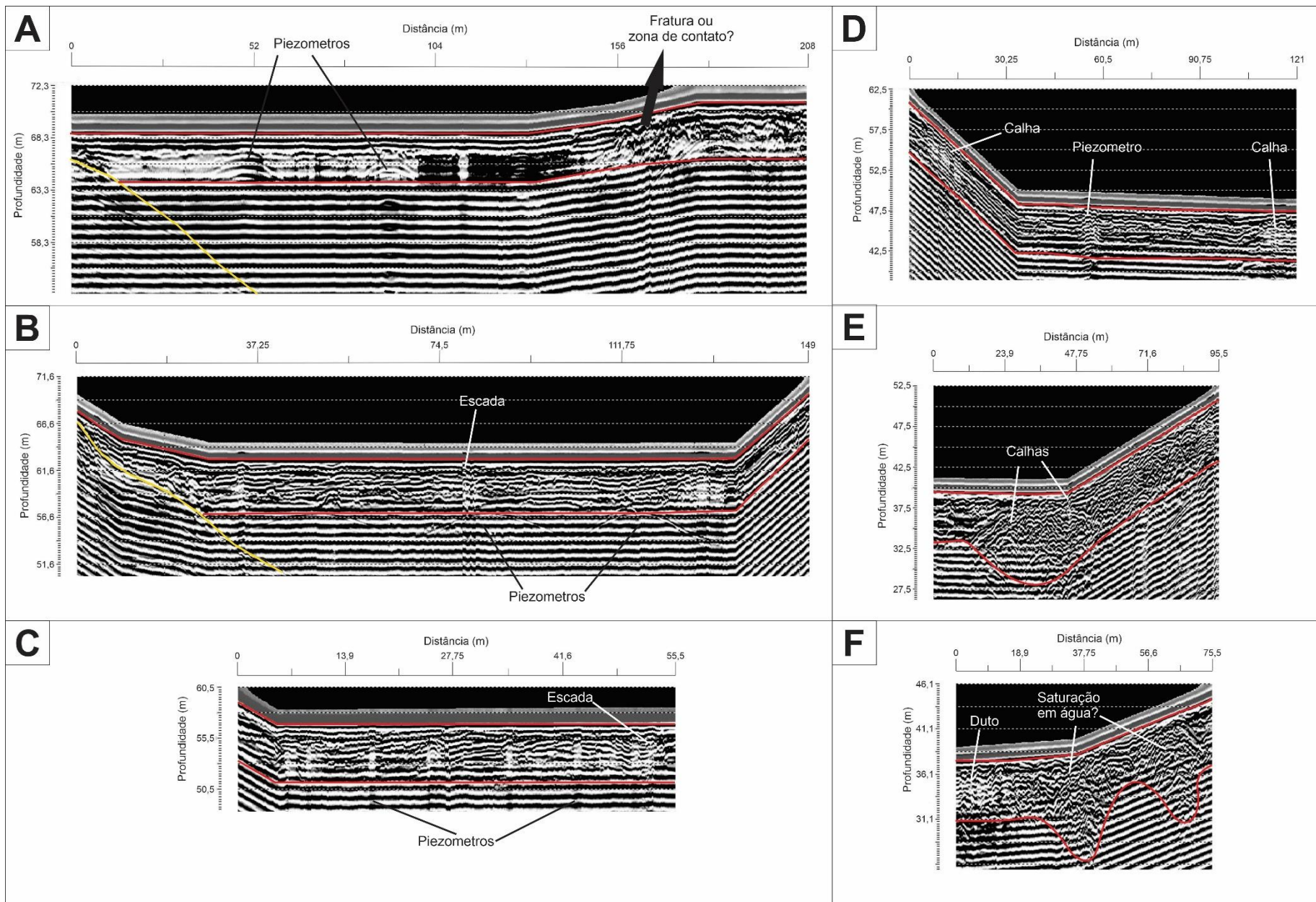


Figura 7.19. Interpretação dos radagramas de GPR, com relação às seções (A) L1; (B) L2; (C) L3; (D) L4; (E) L5; (F) L6.

A seção L1 (Figura 7.19A), relativa à crista da barragem, exhibe a atitude de mergulho da ombreira direita que, de maneira acentuada, inclina-se em direção ao centro do maciço. Tal feição é indicada pela linha de cor amarela. A região circundada em vermelho representa o solo compactado do aterro de barragem, cujos refletores exibem padrão difuso e pouco estruturado, embora de direção horizontalizada. A presença de piezômetros tende a gerar um padrão de reflexão de hipérbolos em profundidade, o qual está bem delimitado na figura. A região de maior interesse corresponde à transição entre a ombreira esquerda e o maciço, na qual observa-se, aparentemente, uma descontinuidade, interpretada como fratura ou zona de contato.

Abaixo da zona delimitada pelas linhas vermelhas, os dados tornam-se ruidosos e pouco significativos, impossibilitando a análises de feições em profundidades inferiores a cota de 63 metros.

O radagrama L2 (Figura 7.19B) assemelha-se ao L1, dispondo do trend de mergulho da ombreira direita além de exibir uma expressiva porção do solo compactado e piezômetros. A interferência presente na porção central da seção remete a uma escada de concreto, posicionada na parte intermediária do maciço. Os dados de reflexão de ondas são significativos até a profundidade de 56 metros, aproximadamente, a partir da qual predomina ruído. O radagrama L3 (Figura 7.19C) ilustra, além do solo compactado, alguns piezômetros e a escada central do maciço. Esta seção é consideravelmente menor, apresentado apenas 55,5 m de comprimento.

Nos radagramas L4 e L5 (Figuras 7.19D e 7.19E), em meio ao solo, estão superpostas regiões de interferência que remetem às calhas de escoamento superficial de água e piezômetros. Em L5, a profundidade de alcance do sinal eletromagnético é subitamente acrescida à distância de 24 metros, na qual o padrão de reflexão de ondas assume a forma de bolsão, em profundidade.

Em L6 (Figura 7.19F), os refletores à distância de 5 m, na cota de 37 m, são descontínuos e pouco expressivos. Nesta região, um duto de descarga metálico intercepta a fundação da barragem. Na mesma seção, são observados os mesmos bolsões de solo representados no radagrama L5. Interpreta-se tais

feições, como regiões de solo saturado, nas quais o sinal eletromagnético foi atenuado e, portanto, intensificado.

Vale colocar que as seções apresentam exagero vertical, onde as escalas horizontal e vertical não coincidem. Sendo assim, a declividade do terreno e a geometria de determinadas feições apresentam deformação.

7.9 Qualidade dos Dados

A qualidade dos dados de ERT e IP foi verificada através da comparação entre as duas aquisições realizadas na Etapa 1 (B1 e B2). Estas foram realizadas com intervalo de uma semana, aproximadamente e, desta forma, concluímos que as seções processadas deveriam apresentar forte similaridade. Na Figura 7.20, é possível verificar que, de fato, as feições e anomalias (de condutividade e resistividade) apresentam geometria e valores bastante próximos.

As discordâncias foram interpretadas como erros ambientais, atribuídas a alterações de condutividade que decorrem do regime de chuvas, quase que incessante, nas imediações e montante da área de estudo. Deve-se, no entanto, considerar a influência do processamento iterativo de dados que tende a resultar em seções levemente distintas, o que é evidenciado em diferentes valores de RMS e norma L2.

Os procedimentos, equipamentos e rotina de aquisição de dados adotados em campo foram os mesmos, o que torna pouco provável a presença significativa de erros sistemáticos instrumentais ou experimentais. Vale mencionar que os dados foram coletados pela mesma equipe, em todas as campanhas e etapas.

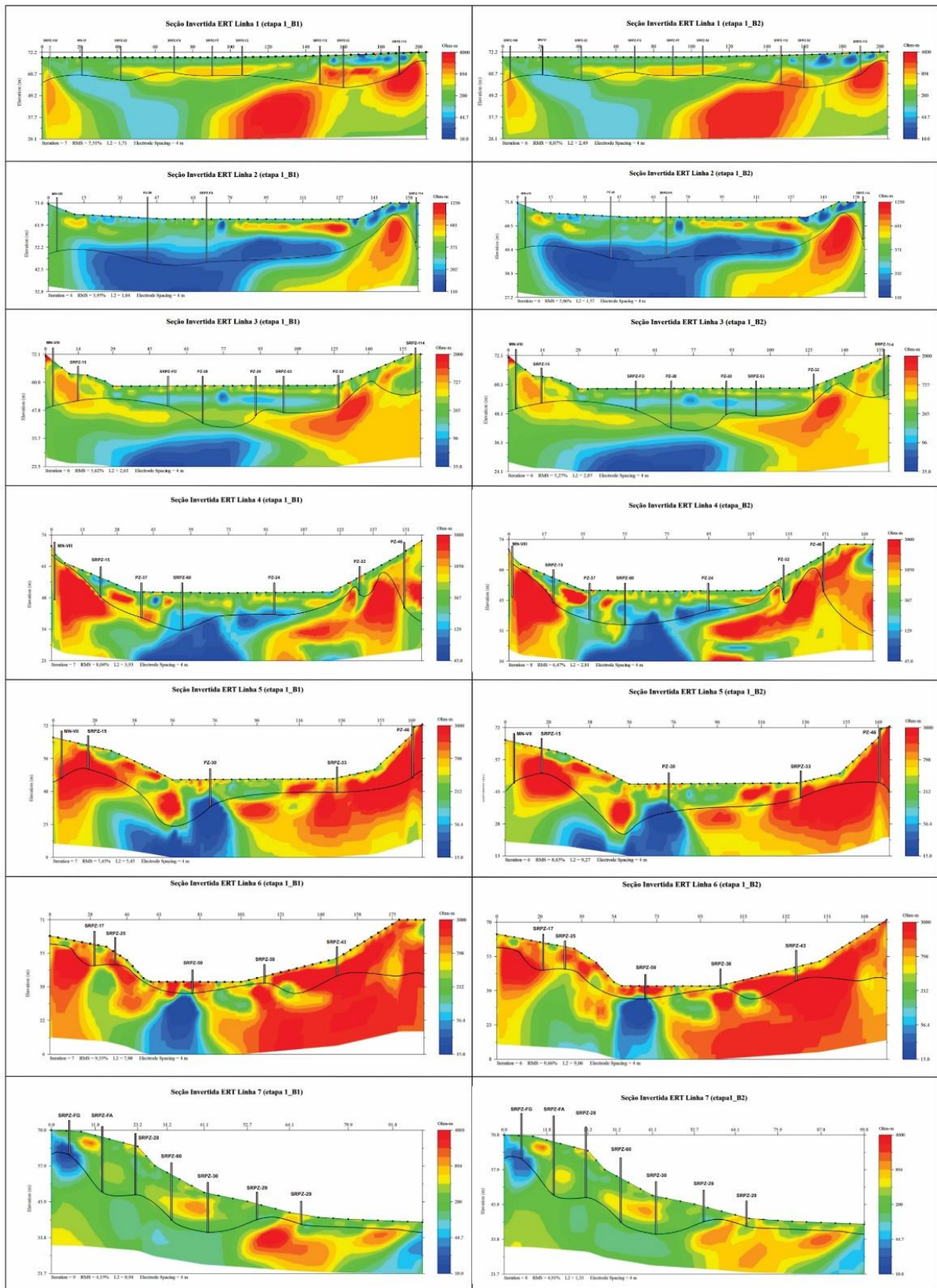


Figura 7.20. Pannel esquemático elaborado para comparação e análise de qualidade das feições de resistividade. (esquerda) seções ERT aquisitadas na Etapa 1_B1; (direita) seções ERT aquisitadas na Etapa 1_B2.

No caso dos blocos de resistividade, as curvas de convergência, a seguir (Figura 7.21), indicam correlação positiva entre os dados de resistividade aparente medidos e preditos, o que garante a qualidade do tratamento das informações coletadas.

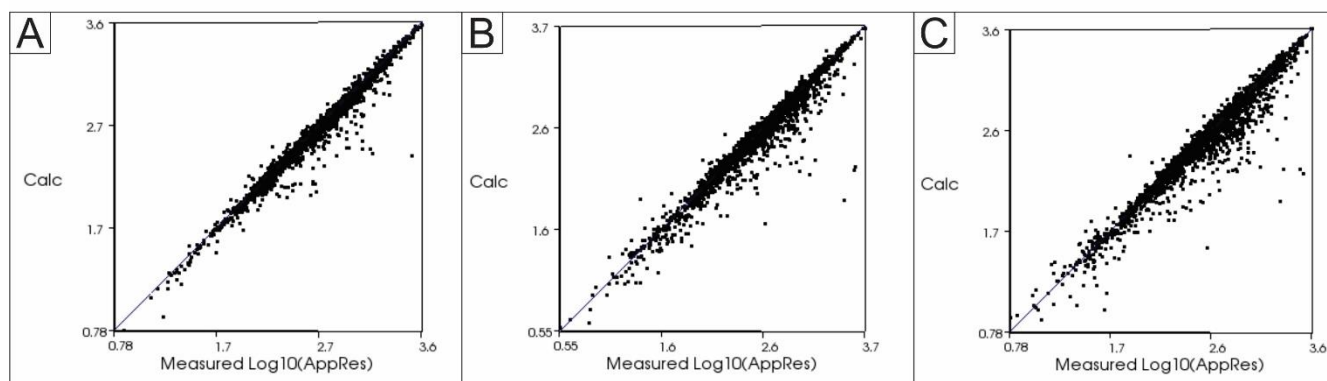


Figura 7.21. (A) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 1_B1; (B) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 1_B2; (C) Curva de convergência relativo ao bloco de resistividade da Etapa 2.

A qualidade dos dados de GPR foi aferida visualmente. As feições de interesse foram detectadas em profundidades de até 15, em média, o que traduz boa intensidade de sinal. O emprego do método permitiu a observação do solo em subsuperfície rasa, além da detecção de estruturas de concreto e instrumentos geotécnicos (piezômetros e calhas).

8. CONCLUSÕES

- A aplicação dos métodos geoeletricos, tomografia de resistividade elétrica (ERT) e polarização induzida (IP), mostrou-se bastante eficiente na detecção e delimitação dos elementos estruturais básicos da barragem estudada (ombreiras e maciço central). A aplicação destes métodos também ajudou a determinar a variação do nível freático interno, o posicionamento do filtro vertical e, possivelmente, de drenos, dutos de captação de água e diafragma plástico.
- Os dados de ERT foram úteis na determinação de valores médios de resistividade elétrica para o solo homogêneo empregado na consolidação do talude da barragem e para as ombreiras, que se constituem em solo coluvionar e rocha sã, basicamente. As zonas ou anomalias de condutividade foram interpretadas como meios saturados em argilominerais ou em soluções eletrolíticas. Este método, ainda foi essencial na caracterização da geometria e volume das feições internas do maciço, em especial comparando-se os dados aqusitados às seções e plantas contidas no projeto geotécnico original da barragem.
- Os dados de IP foram particularmente importantes na remoção da ambiguidade presente nos dados de ERT, ou seja, em determinar se o meio condutivo é argiloso ou está saturado em água, uma vez que as anomalias de baixa cargabilidade tendem a indicar a presença de solução eletrolítica.
- **Feições de interesse detectadas:** **1)** Possível descontinuidade na ombreira esquerda, interpretada como zona de fratura ou contato litológico, e na qual observa-se possível infiltração de água; **2)** Zonas de elevada saturação em água no aterro central, na seção L2; **3)** Camada plano-paralela resistiva no talude central na seção L3, interpretada como sendo o diafragma plástico da barragem; **4)** Zonas de baixa cargabilidade, nas seções de IP, em L3 e que podem corresponder a regiões de infiltração de água proveniente do reservatório e das chuvas; **5)** Presença de dutos e drenos (anomalias de alta condutividade) em L4, L5 e L6; **6)** Bloco resistivo cravado sobre a fundação, nas imediações da ombreira direita, em L5; **7)** Cavidades ou meios saturados em água em L6,

imediatamente sobre a fundação da barragem; **8)** Foi possível identificar o rebaixamento do nível d'água, a partir do filtro vertical, na seção transversal (L7). Nesta mesma seção, foi detectada a presença da ensecadeira e do enrocamento no pé do talude de jusante.

- As seções de time-lapse não revelaram alterações importantes de condutividade no domínio do tempo, ou seja, no decorrer dos meses de outubro de 2019 a março de 2020, demonstrando que a barragem manteve sua estrutura interna praticamente intacta, apesar das variações pluviométricas e de nível do reservatório.
- Os blocos de resistividade mostram, fundamentalmente, as mesmas feições e geometrias que as seções 2D de resistividade, permitindo, contudo, melhor dimensionamento de cada porção interna do talude.
- Os métodos geoeletricos se destacam, neste estudo, pela boa qualidade e resolução das imagens obtidas, com baixos valores de RMS e profundidades de até 50 m, por meio do método Dipolo-Dipolo e arranjo de eletrodos com espaçamento relativo de 4 m. Os dados de altimetria coletados, através das estações GNSS, ajustaram quase que perfeitamente as seções, representando rigorosamente a topografia do sítio da barragem.
- A utilização do GPR mostrou-se eficaz na detecção do solo compactado raso do aterro, em profundidades de até 10 metros. Foi também possível identificar a presença de padrões de interferência, em hipérbole, associados a presença de estruturas metálicas ou de concreto em meio ao maciço, tais quais, piezômetros, dutos de descarga, calhas de escoamento superficial e escadas.
- Apenas no radagrama da crista da barragem foi observada uma possível descontinuidade ou zona de fratura, nas imediações da ombreira direita, de maneira similar ao observado nas seções de ERT e cargabilidade. Tal região seria, portanto, potencialmente instável e passível de cuidados e análises mais detalhadas.

Referências Bibliográficas

- Abdulsamad, F., Revil, A., Ahmed, A. S., Coperey, A., Karaoulis, M., Nicaise, S., & Peyras, L., 2019. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments. *Engineering Geology*, 254, 89-101.
- AGI (Advanced Geosciences, Inc.), 2008. Instruction Manual for EarthImager 2D Version 2.4. 0 Resistivity and IP Inversion Software.
- Ahmed, A. S., Revil, A., Abdulsamad, F., Steck, B., Vergniault, C., & Guihard, V., 2020. *Engineering Geology*, 271, 105604.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. D., & Fuck, R. A., 1977. Províncias estruturais brasileiras. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8(1977), 363-391.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.
- Anchuela, Ó. P., Frongia, P., Di Gregorio, F., Sainz, A. C., & Juan, A. P., 2018. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy). *Engineering Geology*, 237, 129-139.
- Annan, A. P., 1999. *Practical processing of GPR data. Sensors and software*, Ontario.
- Annan, A. P., 2001. GPR—trends, history, and future developments. In *Proceedings of the EAGE Conference*.
- Annan, A. P., 2003. GPR Stratigraphy-Physical Mechanisms. In *2003 Seattle Annual Meeting*.
- Annan, A. P., 2005. Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics* (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.
- Araújo, C. B., 2006. *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.
- Azevedo, A. A., & Albuquerque Filho, J. L., 1998. *Geologia de engenharia*. CNPq/FAPESP.

- Baker, G. S., Jordan, T. E., Pardy, J., 2007. An introduction to ground penetrating radar (GPR). *Special Papers-Geological Society of America*, 432, 1.
- Baker, G. S., 2013. Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal*, 12(1).
- Bery, A. A., Saad, R., Mohamad, E. T., Jinmin, M., Azwin, I. N., Tan, N. M. A., Nordiana, M. M., 2012. Electrical resistivity and induced polarization data correlation with conductivity for iron ore exploration. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 3223-3233.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Bligh, W. G., 1910. Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Eng News* 64(26):708–710.
- Borges, W. R., & Porsani, J. L., 2002. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(3), 187-192.
- Borges, W. R., & Porsani, J. L., 2003. Caracterização geofísica rasa do sítio controlado do IAG-USP: resultados preliminares. In 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (pp. cp-168). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Bortolin, J. R. M., & Malagutti Filho, W., 2010. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15(4), 367-374.
- Camarero, P. L., 2016. Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos. *Dissertação de mestrado, UNESP*.
- Camarero, P. L., Moreira, C. A., & Pereira, H. G., 2019. Analysis of the physical integrity of earth dams from electrical resistivity tomography (ERT) in Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 176(12), 5363-5375.
- Campbell, R. B., Bower, C. A., Richards, L. A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity

and ion concentration for soil extracts. In Soil Science Society of America Proceedings (Vol. 13, pp. 66-69).

Carvalho, J.M.F., Henriques, P., Falé P. Luís G., 2008. Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45:1306–131.

Case, J. S., 2012. Inspection of earthen embankment dams using time lapse electrical resistivity tomography. Dissertation, The University of Mississippi.

Castro, L. V. P. D., 2008. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

Chave, A. D., & Jones, A. G., 2012. *The magnetotelluric method: Theory and practice*. Cambridge University Press.

Chiossi, N. J., 2009. *Destruindo o Planeta Terra*. Editora AM.

Chiossi, N., 2015. *Geologia de engenharia*. Oficina de Textos.

Costa, T. D., & Lança, R., 2001. *Barragens*. Escola superior de tecnologia Universidade do algarve-Área Departamental de Engenharia Civil Núcleo de Hidráulica e Ambiente. Portugal.

Costa, W. D., 2016. *Geologia de barragens*. Oficina de Textos.

Daniels, D. J., 2005. Ground penetrating radar. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*.

Darcy, H., 1865. *Les fontaines publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Paris.

Dentith, M., & Mudge, S. T., 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Di, Q., & Wang, M., 2010. Determining areas of leakage in the Da Ye Dam using multi-electrode resistivity. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 69(1), 105-109.

Dias, C. A., 2017. *Método Geofísico Eletromagnético a Multifrequência*, Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro.

- Dong, Y., & Ansari, F., 2011. Non-destructive testing and evaluation (NDT/NDE) of civil structures rehabilitated using fiber reinforced polymer (FRP) composites. In *Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures* (pp. 193-222). Woodhead Publishing.
- Duarte, A. P., 2008. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. UFMG, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte.
- Figueiredo, B. R., 2000. *Minérios e ambiente*. Editora da UNICAMP.
- Filho, P. L. M., & Geraldo, A., Barragens e reservatórios. In: Brito, S. N. A., & Oliveira, A. M. dos S., 1998. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. Cap. 24. pp. 397-418.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can Geotech J* 37(5):1000–1024.
- Francke, J., & Utsi, V., 2009. Advances in long-range GPR systems and their applications to mineral exploration, geotechnical and static correction problems. *first break*, 27(7).
- Freitas, C. M. D., Silva, M. A. D., Menezes, F. C. D., 2016. O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. *Ciência e Cultura*, 68(3), 25-30.
- Gabryś, M., Kryszyn, K., Ortyl, Ł., 2019. GPR surveying method as a tool for geodetic verification of GESUT database of utilities in the light of BSI PAS128. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 107(1), 49-59.
- Gandolfo, O. C. B., 2007. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Gordan, B., & Adnan, A., 2017. Spectrum Response Analysis of Concrete Face Rock Fill Dam, Case Study Bakun Dam. IV International Conference on Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams (LTBD 2017), 655-662 p. DOI:10.3217/978-3-85125-564-5-088.

- Goyal, V. C., Gupta, P. K., Seth, S. M., Singh, V. N., 1996. Estimation of temporal changes in soil moisture using resistivity method. *Hydrological processes*, 10(9), 1147-1154.
- Habberjam, G. M., & Watkins, G. E., 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical prospecting*, 15(3), 445-467.
- Hack, R., 2000. Geophysics for slope stability. *Surveys in geophysics*, 21(4).
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J., 2000. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*. Vol. 3 . Grupo Gen-LTC.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos Neto, M. D. C., Silva, L. D., Trouw, R. A. J., & Janasi, V. D. A., 2004. *Província mantiqueira. Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR, 203-234.*
- Heilbron, M., Valeriano, C. D. M., Valladares, C. S., & Machado, N., 2017. A orogênese brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4), 249-266.
- Johansson, S., & Dahlin, T., 1996. Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements. *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 1(3), 229-247.
- Jol, H. M., 2009. *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. *Geofísica de exploração*. Oficina de textos.
- Kemna, A., Binley, A., Ramirez, A., Daily, W., 2000. Complex resistivity tomography for environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 77(1-2), 11-18.
- Kemna, A., Binley, A., Slater, L., 2004. Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics*, 69(1), 97-107.
- Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., ... & Kruschwitz, S., 2012. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*, 10(6), 453-468.
- Kirsch, R., 2006. *Groundwater geophysics (Vol. 493)*. Berlin: Springer.

- Lane, E. W., 1934. Security from under-seepage masonry dams on earth foundations. Trans ASCE 60(4):929–966
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 354 p.
- Machado, W. G. D. F., 2007. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Tese de Doutorado, USP.
- Martínez-Moreno, F. J., Delgado-Ramos, F., Galindo-Zaldívar, J., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., & González-Castillo, L., 2018. Identification of leakage and potential areas for internal erosion combining ERT and IP techniques at the Negratín Dam left abutment (Granada, southern Spain). Engineering Geology, 240, 74-80.
- McNeil, J. D., 1980. Electrical Conductivity of Soils and Rocks, Technical note TN-5. GEONICS Limited, Ontario, Canada, 22p.
- Massad, F., 2010. Obras de terra: curso básico de geotecnia. Oficina de textos.
- Meheni, Y., Guérin, R., Benderitter, Y., Tabbagh, A., 1996. Subsurface DC resistivity mapping: approximate 1-D interpretation. Journal of Applied Geophysics, 34(4), 255-269.
- Milsom, J., 2003. Field geophysics (Vol. 31). John Wiley & Sons.
- Minsley, B. J., & Ikard, S., 2010. Geophysical Investigations at Hidden Dam, Raymond, California Flow Simulations. U. S. Geological Survey.
- Moura, H. P., & Malagutti Filho, W., 2003. Métodos de Eletrorresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. Geociências, 22.
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., & Shirke, J. M., 2001. Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods. Engineering Geology, 59(3-4), 281-295.
- Perini, D. S., 2009. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado, UNB.

- Porsani, J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, USP, São Paulo. pp. 145.
- Porsani, J. L., Borges, W. R., Rodrigues, S. I., Hiodo, F. Y., 2006. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1), 49-61.
- Richards, K. S., & Reddy, K. R., 2007. Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 381-402.
- Rodrigues, C. T., 2018. Geofísica aplicada à investigação da barragem de rejeito BR, do complexo de mineração de Tapira, Minas Gerais.
- Rodrigues, J., Cirone, A., Tinoco, P., 2019. Lições da Tragédia de Brumadinho. *Soft Soil Brazilian Review*, 5(4), 6 p.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*, 83(2), 173-193.
- Senos Matias, M. J., 2002. Square array anisotropy measurements and resistivity sounding interpretation. *Journal of Applied Geophysics*, 49(3), 185-194.
- Sharma, P.V., 1997, *Environmental and engineering geophysics: Cambridge, United Geophysical Investigations at Hidden Dam Kingdom*, Cambridge University Press, 475 p.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., 1977. Some engineering problems with dispersive clays. In: Sherard, J. L., & Decker, R. S., (eds) *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. ASTM Special Technical Publication, vol 623, pp 1–11.
- Shin, S., Park, S., & Kim, J. H., 2019. Time-lapse electrical resistivity tomography characterization for piping detection in earthen dam model of a sandbox. *Journal of Applied Geophysics*, 170, 103834.

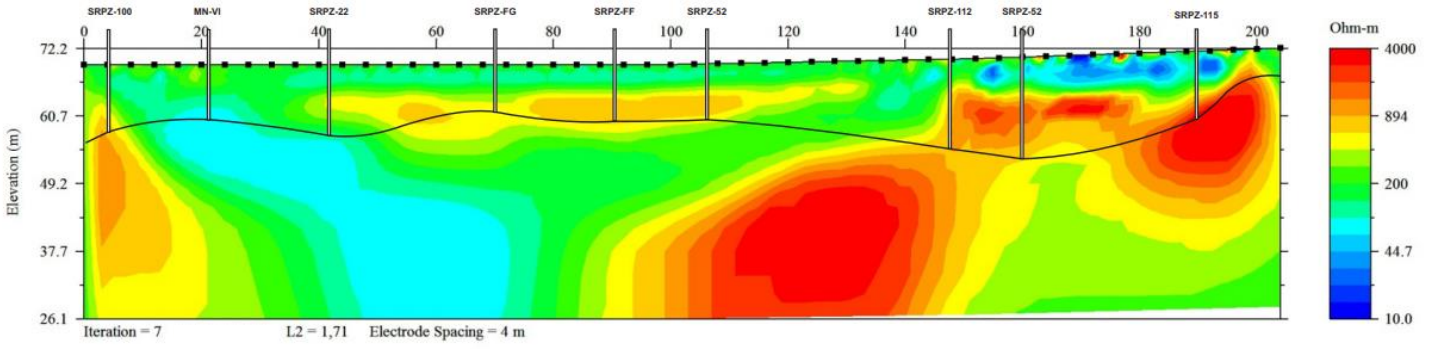
- Silva, L. D., & Cunha, H. D. S., 2001. Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. *Brasília: CPRM*, 1-12.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., & Johansson, S., 2005. Using resistivity measurements for dam safety evaluation at Enemossen tailings dam in southern Sweden. *Environmental geology*, 49(2), 267-273.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H., 2008. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), 155-164.
- Slater, L., & Binley, A., 2006. Synthetic and field-based electrical imaging of a zerovalent iron barrier: Implications for monitoring long-term barrier performance. *Geophysics*, 71(5), B129-B137.
- de Souza, L. A. P., 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Teixeira, W. L. E., 2013. Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai-Espanha. Tese de doutorado, UFRN.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A., 1976. *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Terzaghi, K., 1922. Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhutung (The failure of dams by piping and its prevention). *Die Wasserkraft*, vol 17, pp 445–449. Reprinted in (1960) *From theory to practice in soil mechanics*. Wiley, New York
- Thomas, H. H., 1976. *The engineering of large dams*, John Wiley, Londres.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Duarte, B. P., Nogueira, J. R., Valladares, C., Almeida, J., ... & Ragatky, C. D., 2007. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos*.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Valeriano, C., Júnior, R. P., de Dios, F. B., Machado, N., ... & de Almeida, J. C. H., 2012. Juvenile contribution of the Neoproterozoic Rio

- Negro magmatic arc (Ribeira Belt, Brazil): implications for western Gondwana amalgamation. *Gondwana Research*, 21(2-3), 422-438.
- Ward, S. H., 1990. *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial: Volume I: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysicists.
- Weber, O. L. dos S., Chitolina, J. C., de Camargo, O. A., Alleoni, L. R. F., 2005. Structural and variable electric charges of highly weathered tropical soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(6), 867-873.
- Williams, K. H., Kemna, A., Wilkins, M. J., Druhan, J., Arntzen, E., N'Guessan, A. L., ... Banfield, J. F., 2009. Geophysical monitoring of coupled microbial and geochemical processes during stimulated subsurface bioremediation. *Environmental science & technology*, 43(17), 6717-6723.
- Xu, X., Zeng, Q., Li, D., Wu, J., Wu, X., Shen, J., 2010. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. *Engineering Geology*, 111(1-4), 31-42.
- Zimmerman, D. T., Cardellino, J. D., Cravener, K. T., Feather, K. R., Miskovsky, N. M., Weisel, G. J., 2008. Microwave absorption in percolating metal-insulator composites. *Applied Physics Letters*, 93(21), 214103.
- Zonge, K., Wynn, J., Urquhart, S., 2005. Resistivity, Induced Polarization, and Complex Resistivity. In: BUTLER, D. K. (Ed.). *Near Surface Geophysics*. Tulsa, OK: SEG, p. 265-300.

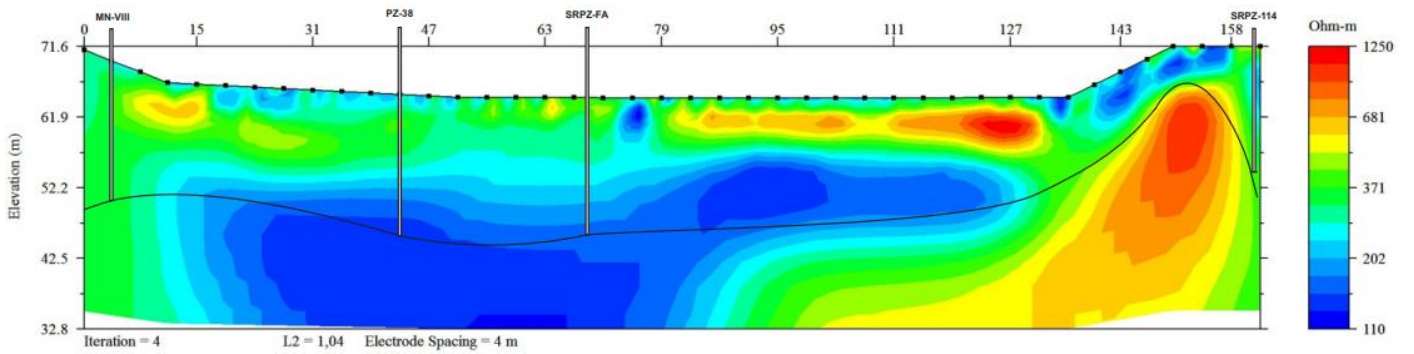
ANEXO I

(ERT etapa 1_b1)

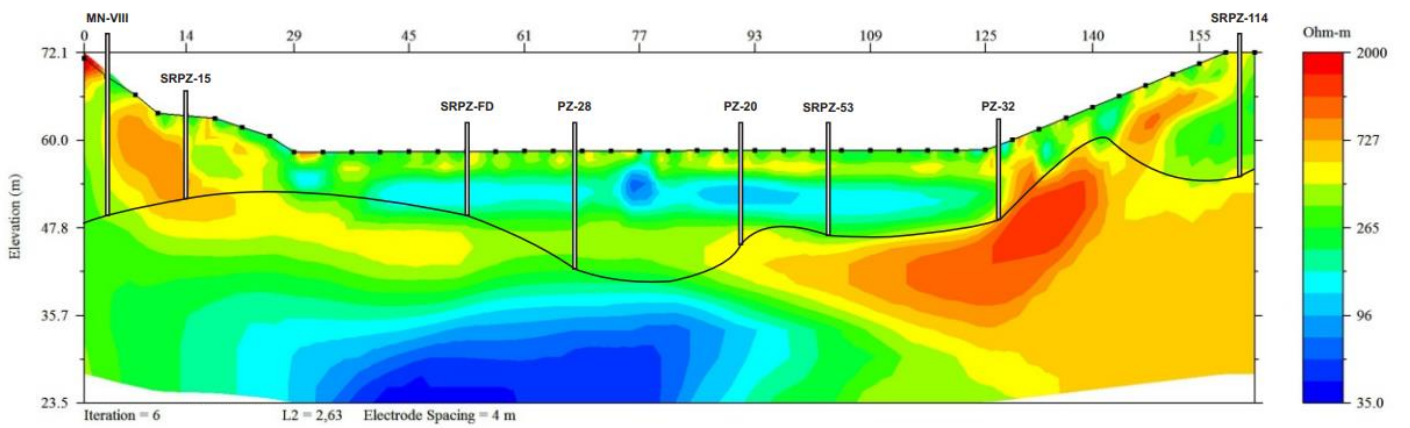
Seção Invertida ERT Linha 1 (etapa 1_B1)



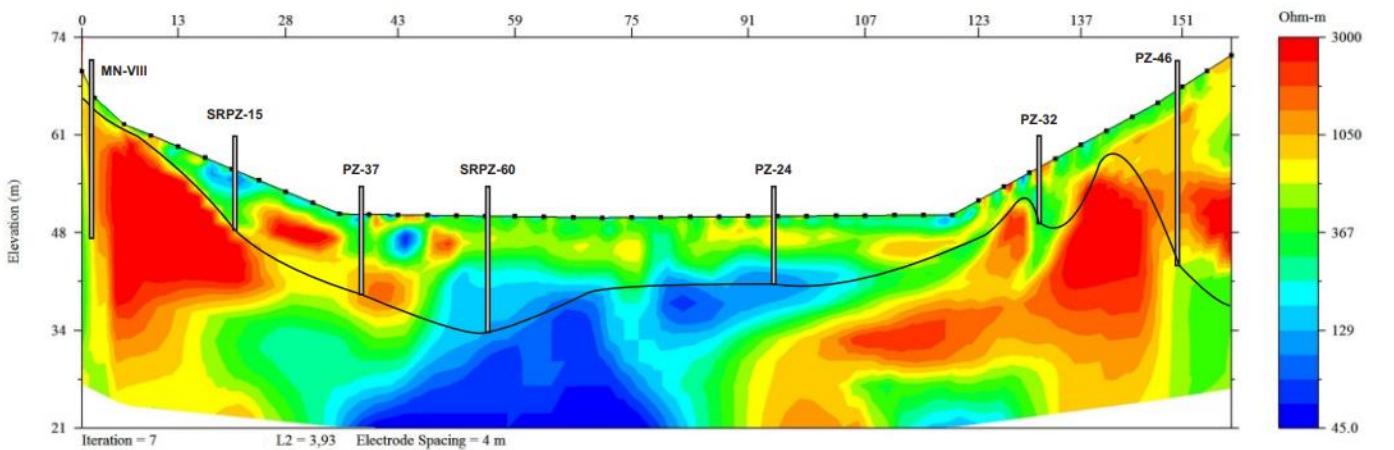
Seção Invertida ERT Linha 2 (etapa 1_B1)



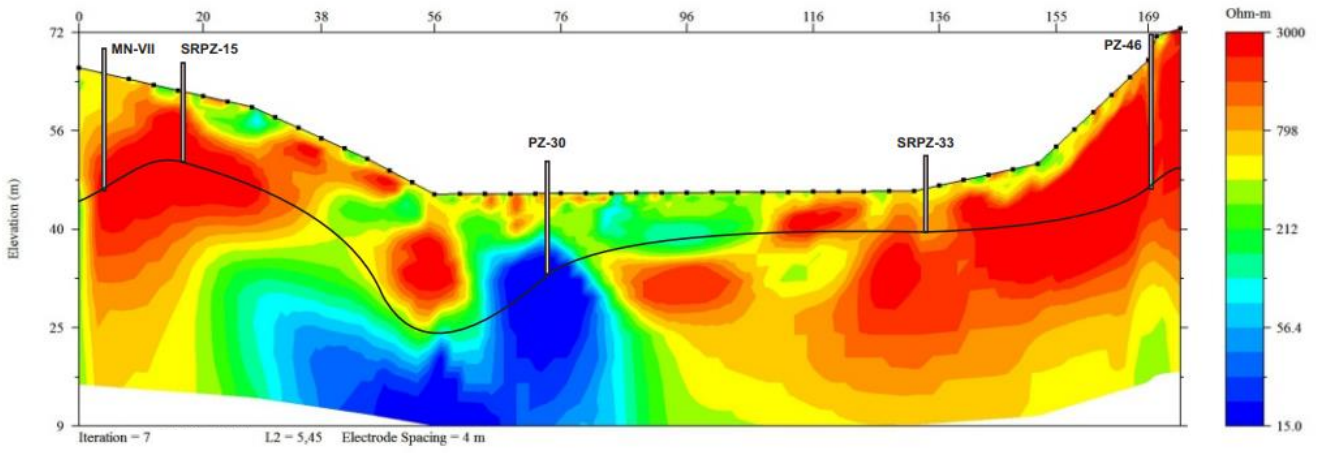
Seção Invertida ERT Linha 3 (etapa 1_B1)



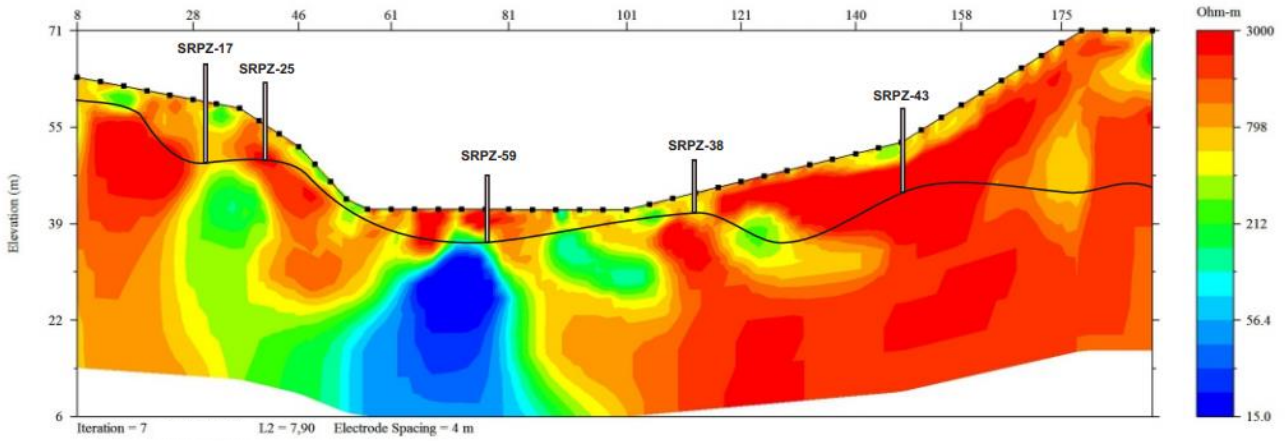
Seção Invertida ERT Linha 4 (etapa 1_B1)



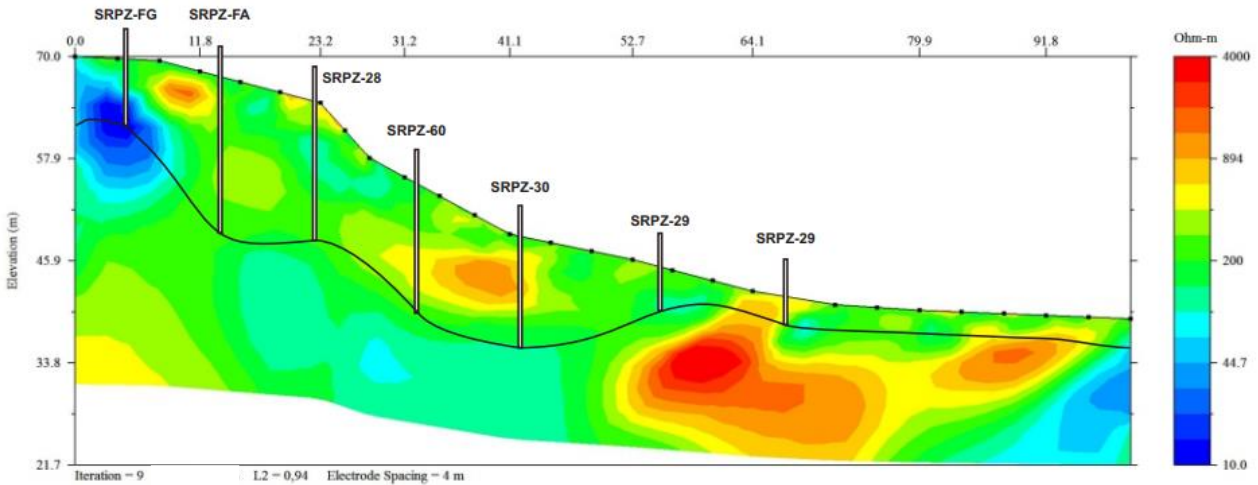
Seção Invertida ERT Linha 5 (etapa 1_B1)



Seção Invertida ERT Linha 6 (etapa 1_B1)



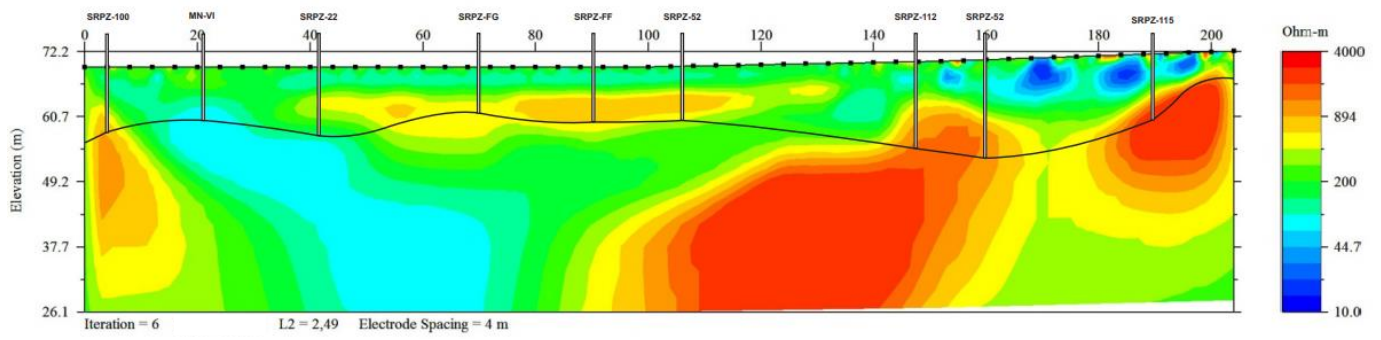
Seção Invertida ERT Linha 7 (etapa 1_B1)



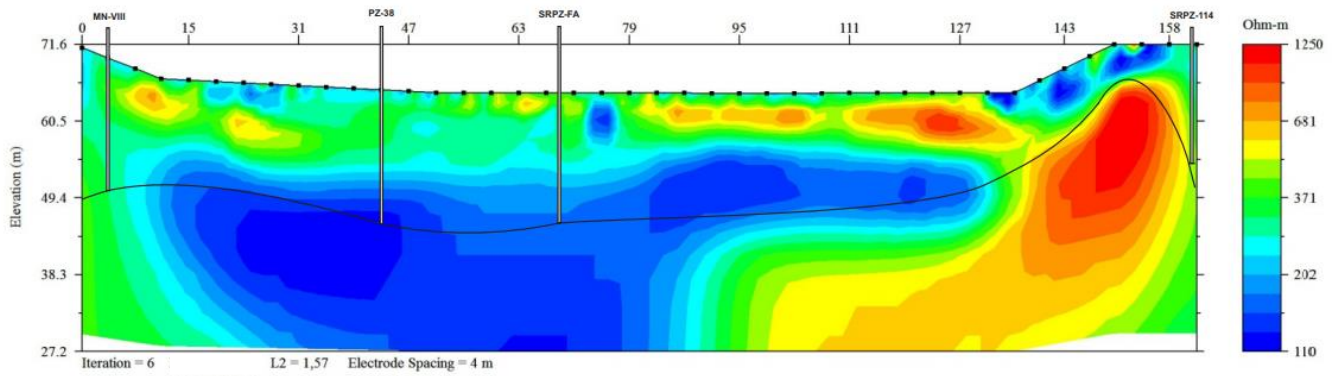
ANEXO II

(ERT etapa 1_b2)

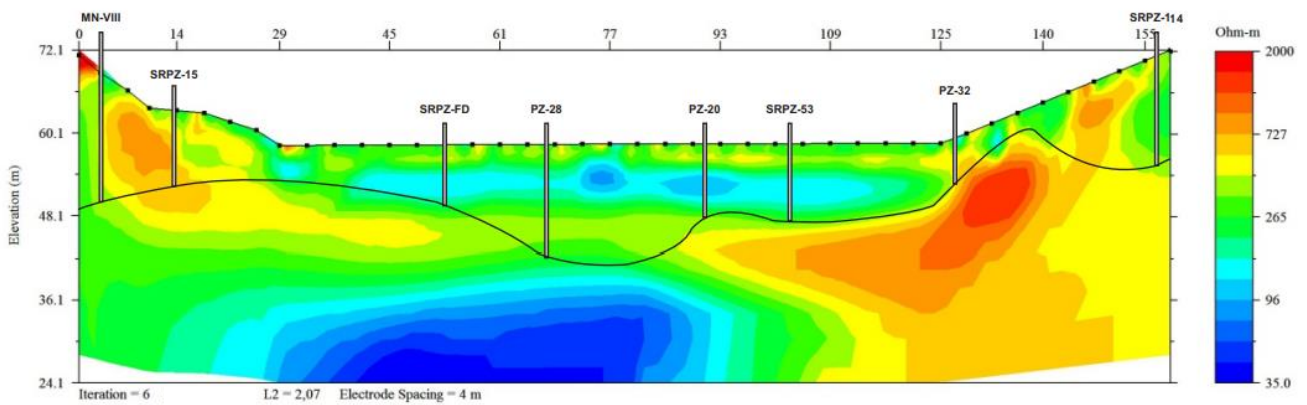
Seção Invertida ERT Linha 1 (etapa 1_B2)



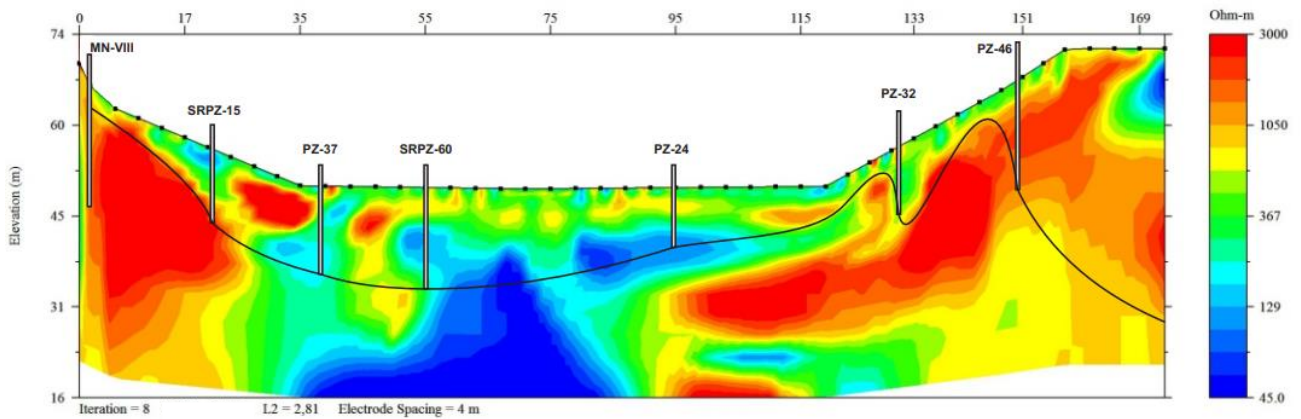
Seção Invertida ERT Linha 2 (etapa 1_B2)



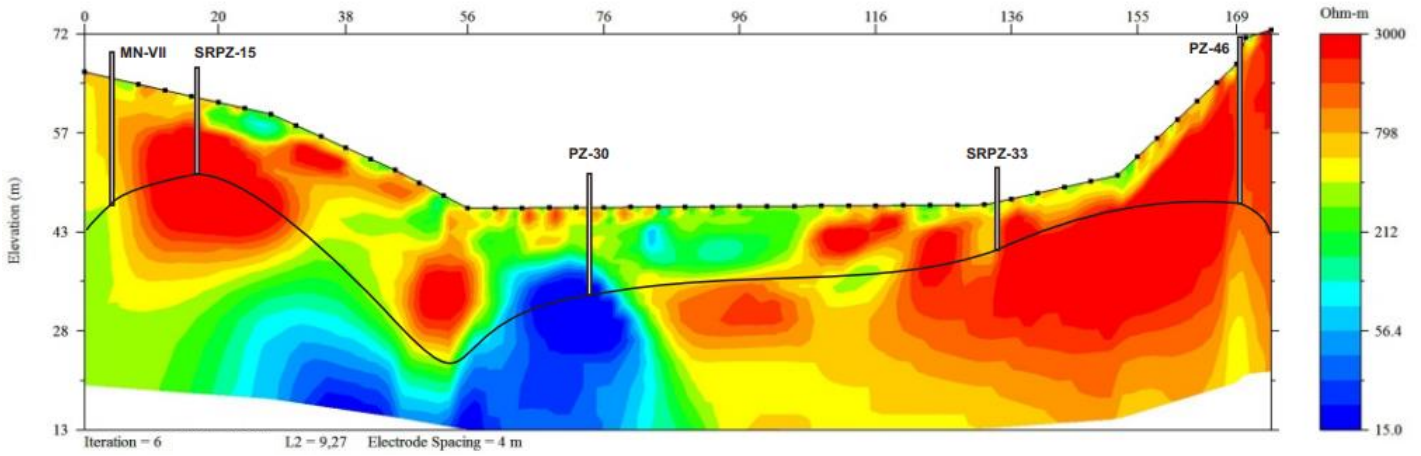
Seção Invertida ERT Linha 3 (etapa 1_B2)



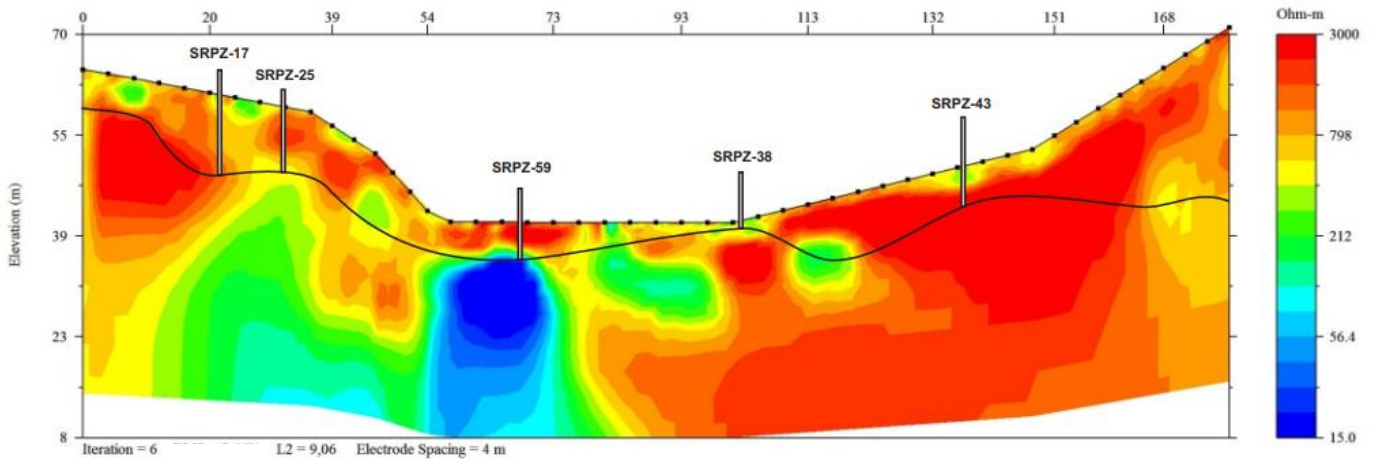
Seção Invertida ERT Linha 4 (etapa B2)



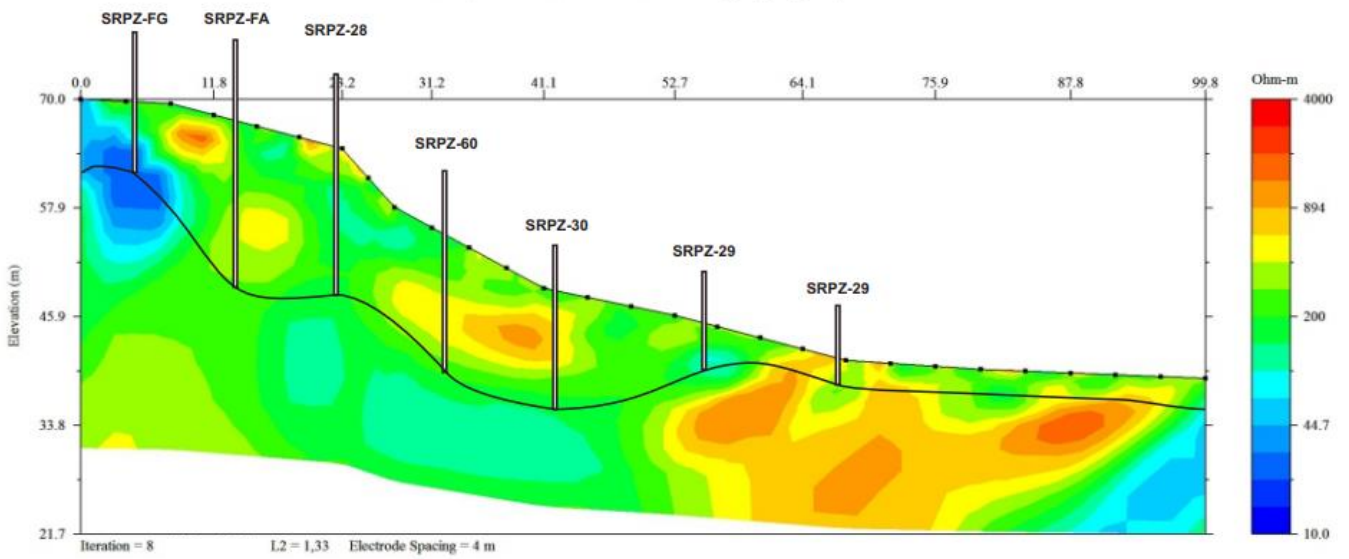
Seção Invertida ERT Linha 5 (etapa 1_B2)



Seção Invertida ERT Linha 6 (etapa 1_B2)



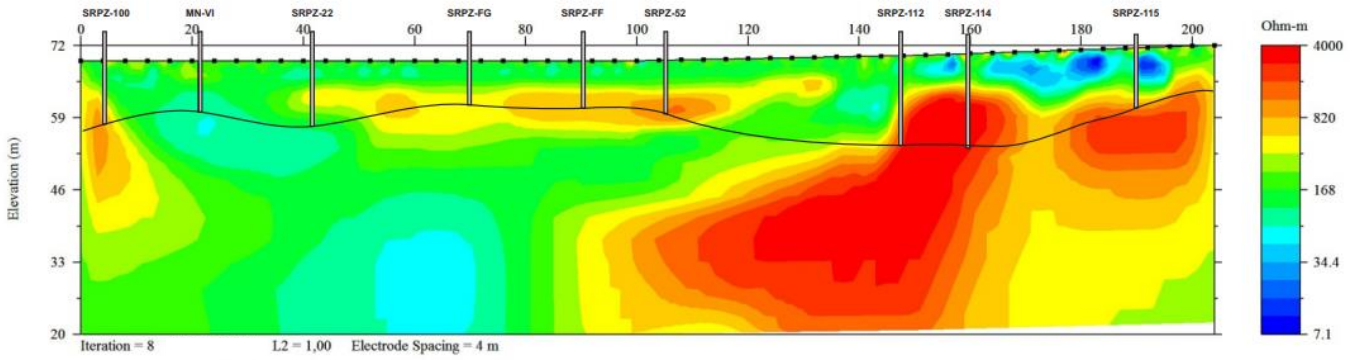
Seção Invertida ERT Linha 7 (etapa1_B2)



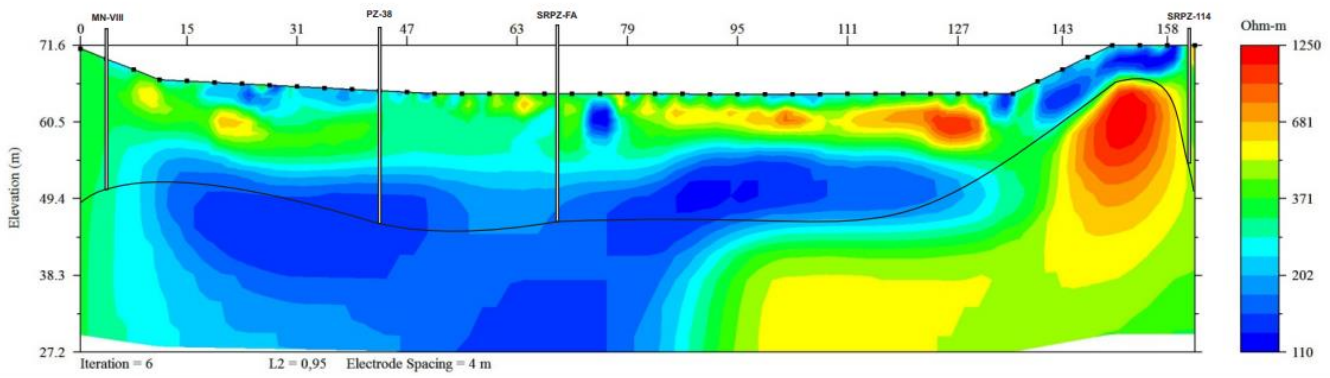
ANEXO III

(ERT etapa 2)

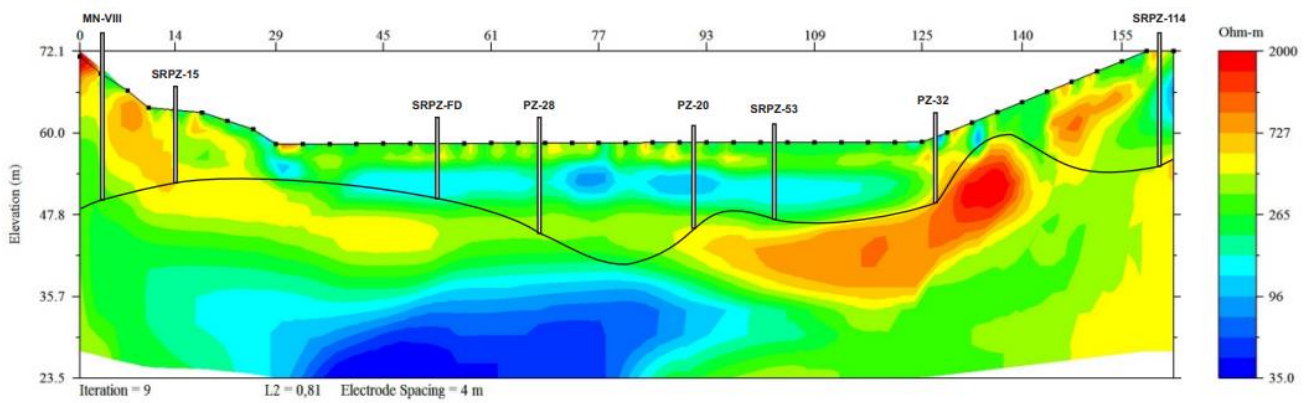
Seção Invertida ERT Linha 1 (etapa 2)



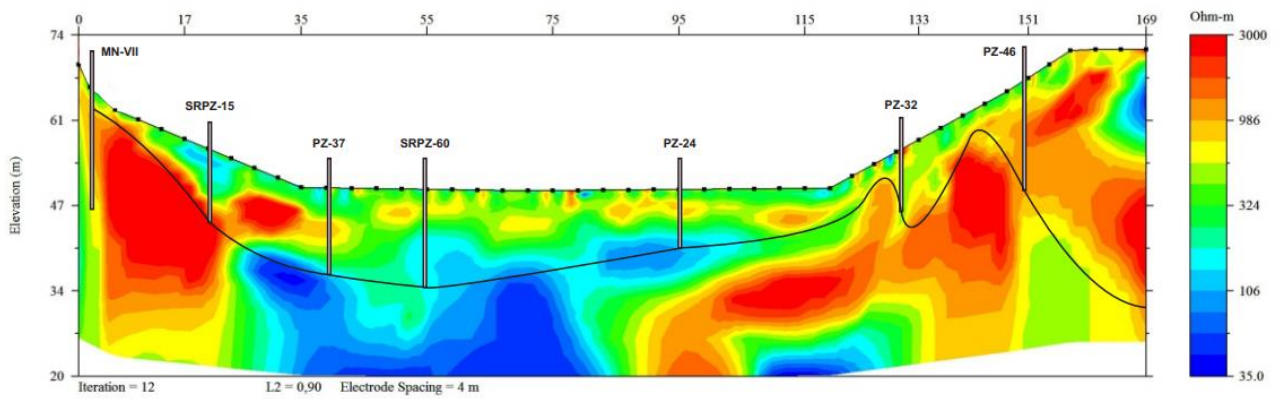
Seção Invertida ERT Linha 2 (etapa 2)



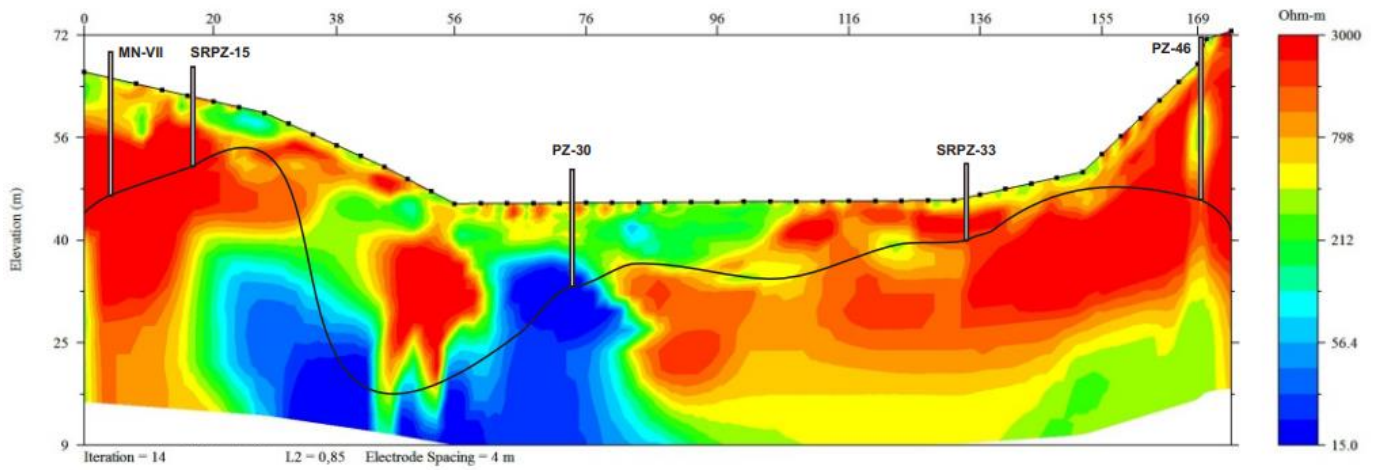
Seção Invertida ERT Linha 3 (etapa 2)



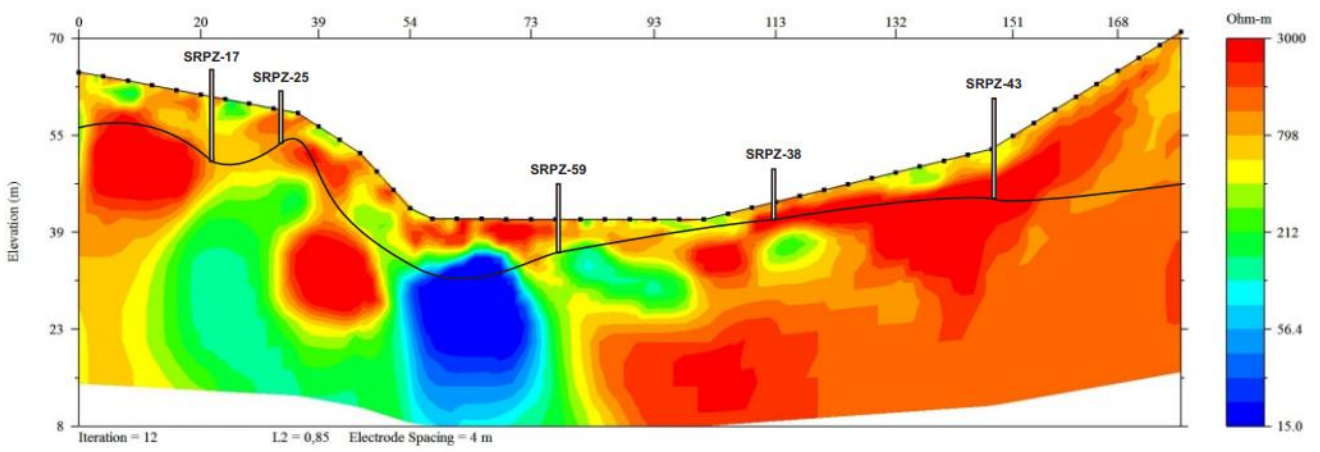
Seção Invertida ERT Linha 4 (etapa 2)



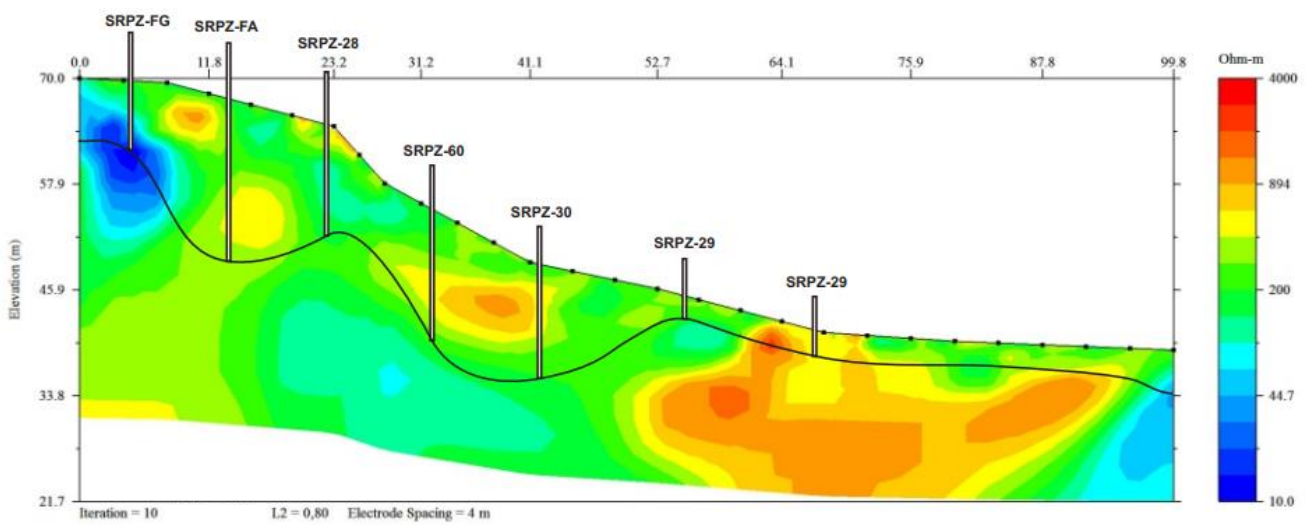
Seção Invertida ERT Linha 5 (etapa 2)



Seção Invertida ERT Linha 6 (etapa 2)



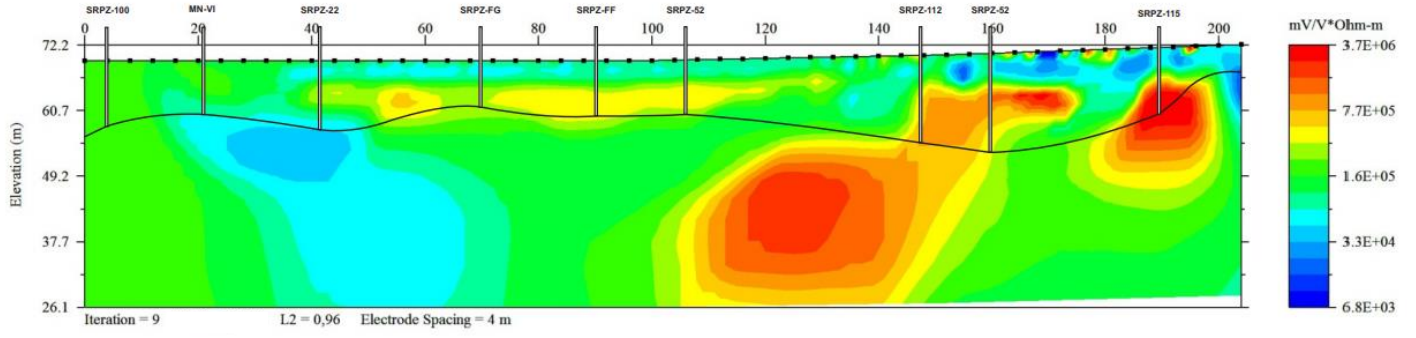
Seção Invertida ERT Linha 7 (etapa 2)



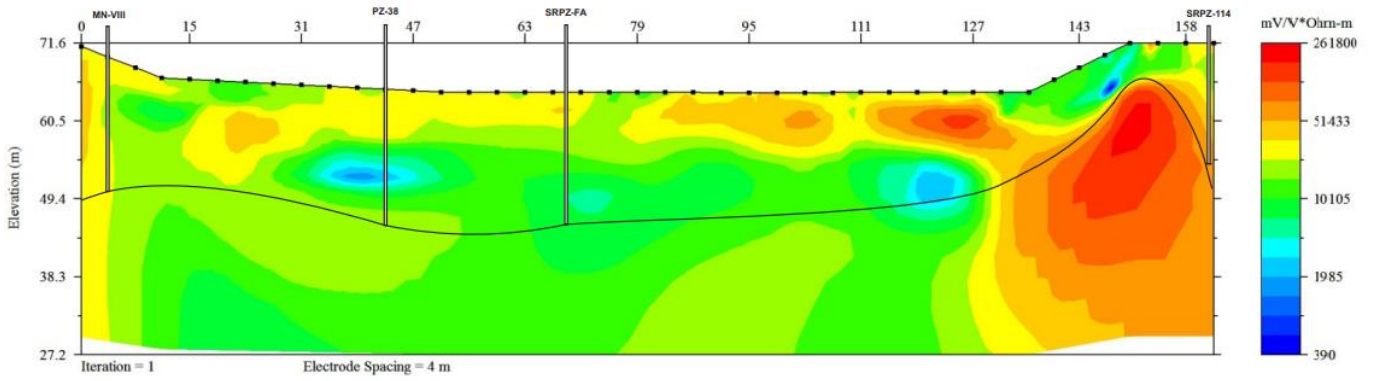
ANEXO IV

(IP etapa 1_b1)

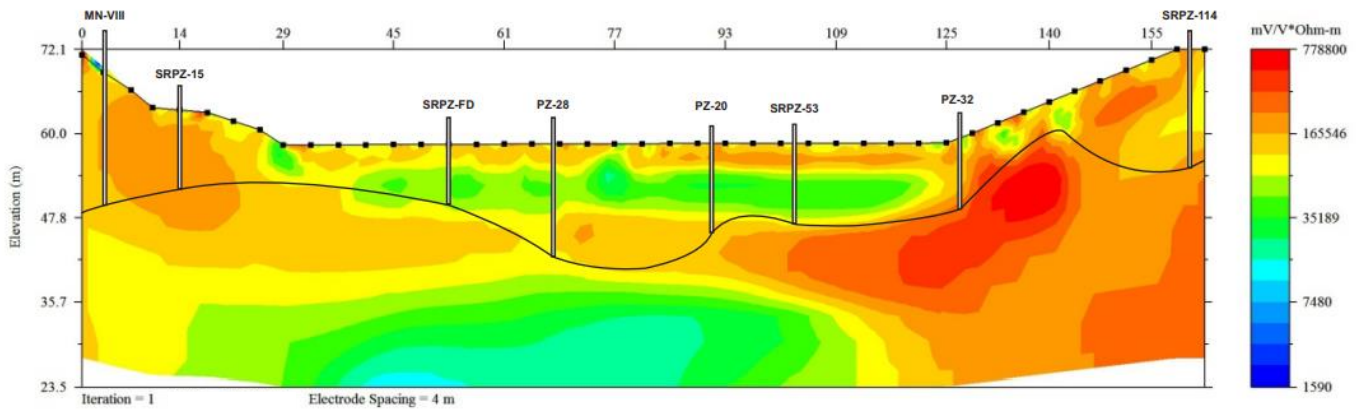
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 1 (etapa 1_B1)



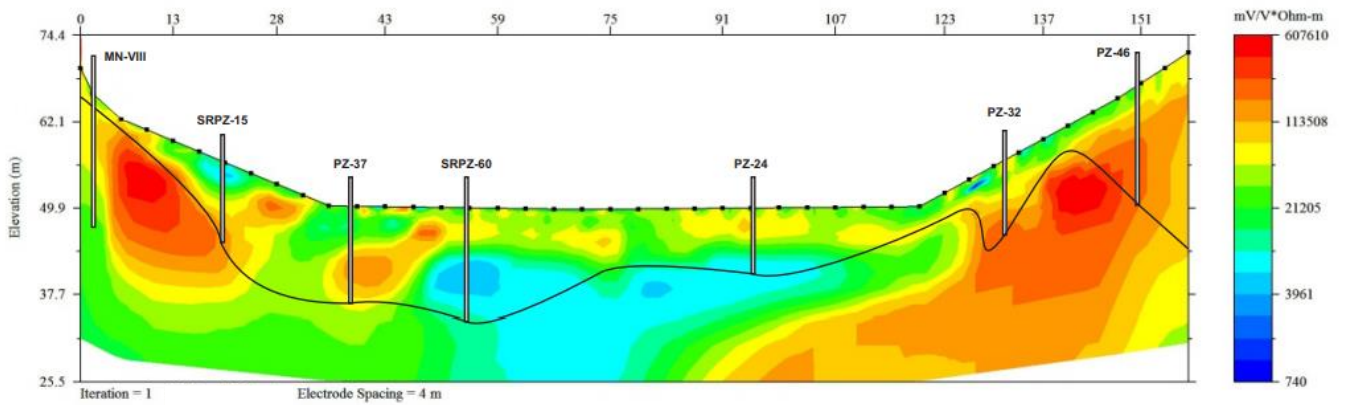
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 2 (etapa 1_B1)



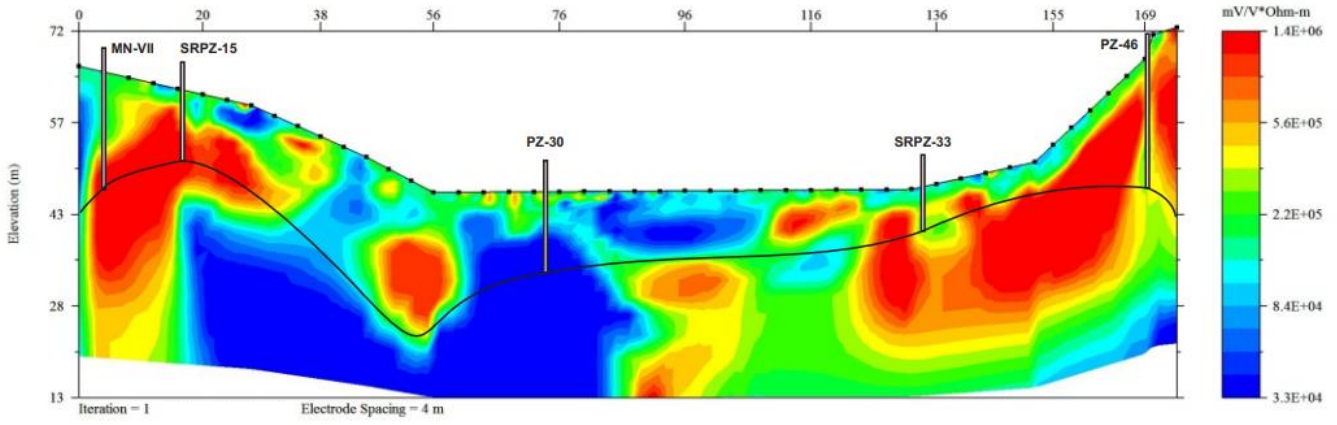
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 3 (etapa 1_B1)



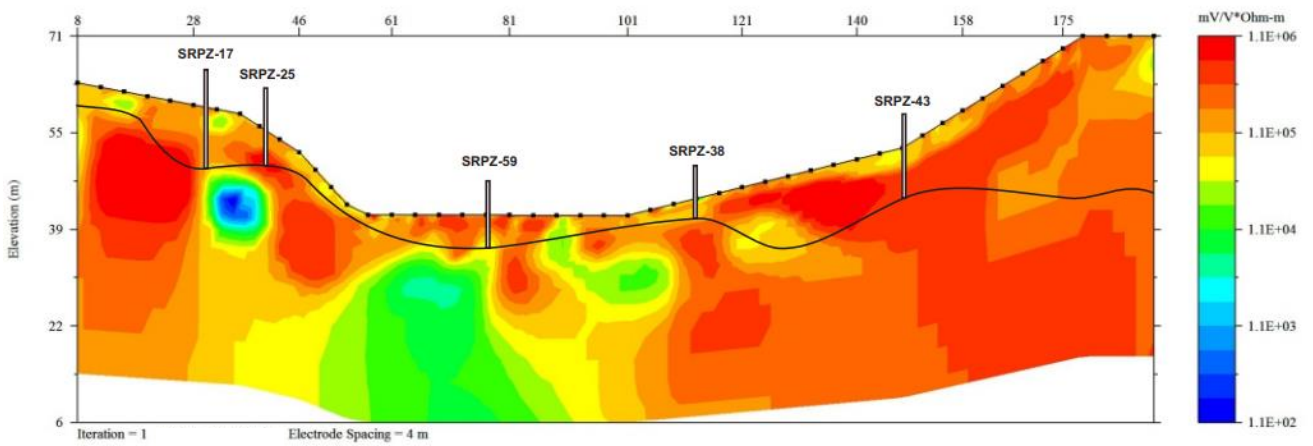
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 4 (etapa 1_B1)



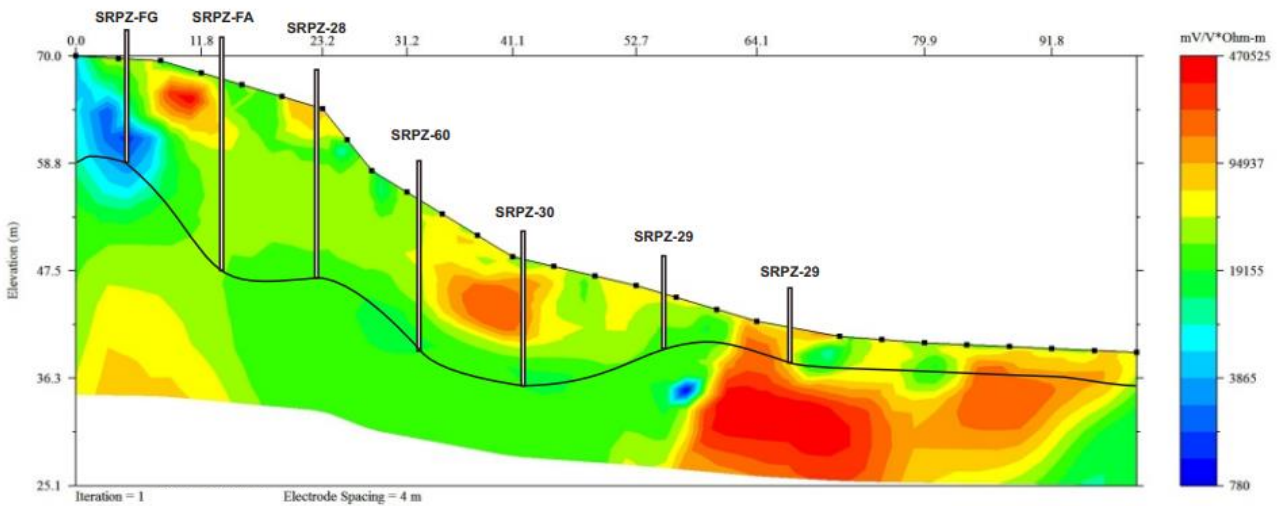
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 5 (etapa 1_B1)



Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 6 (etapa 1_B1)



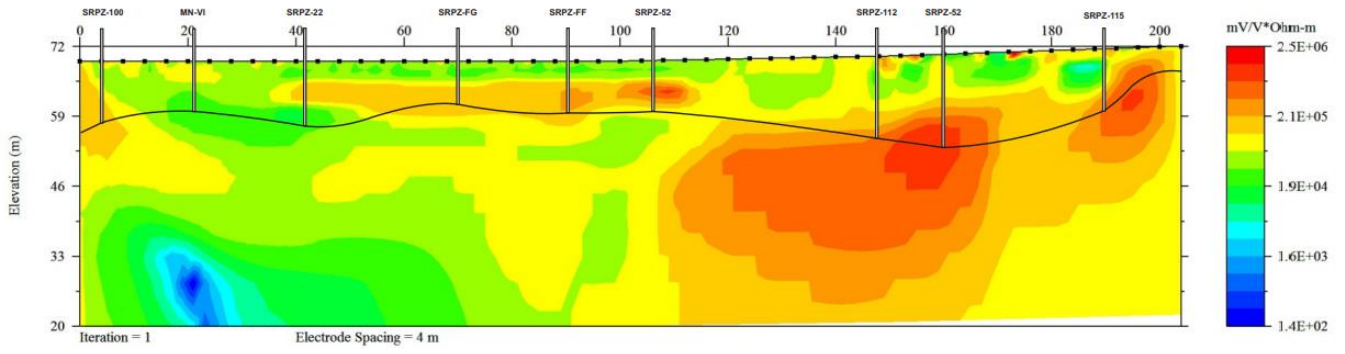
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 7 (etapa 1_B1)



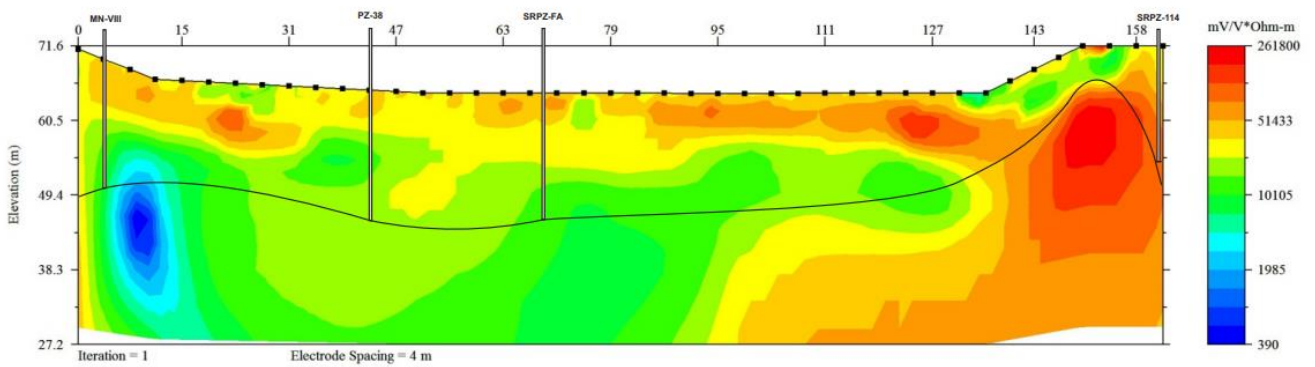
ANEXO V

(IP etapa 1_b2)

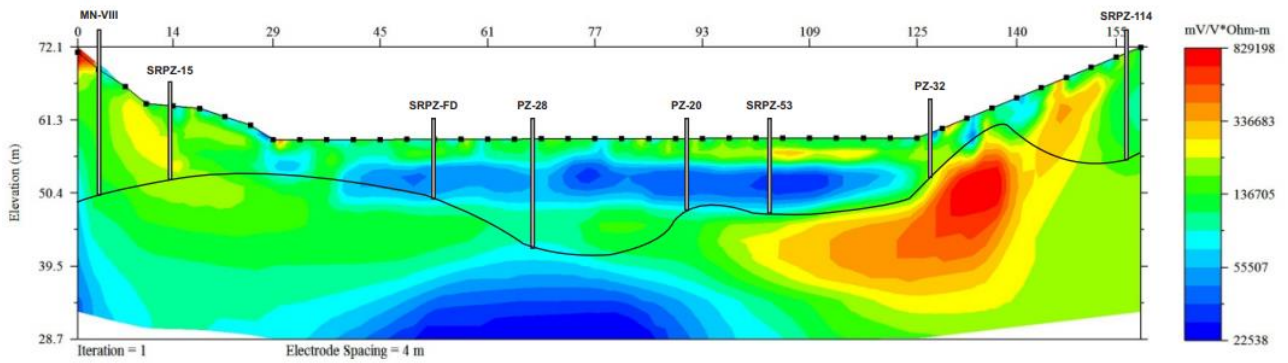
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 1 (etapa 1_B2)



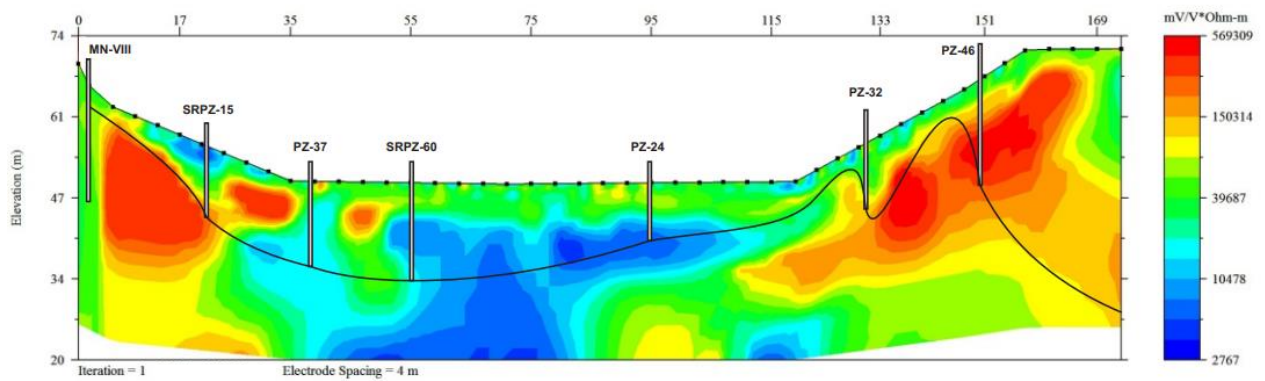
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 2 (etapa 1_B2)



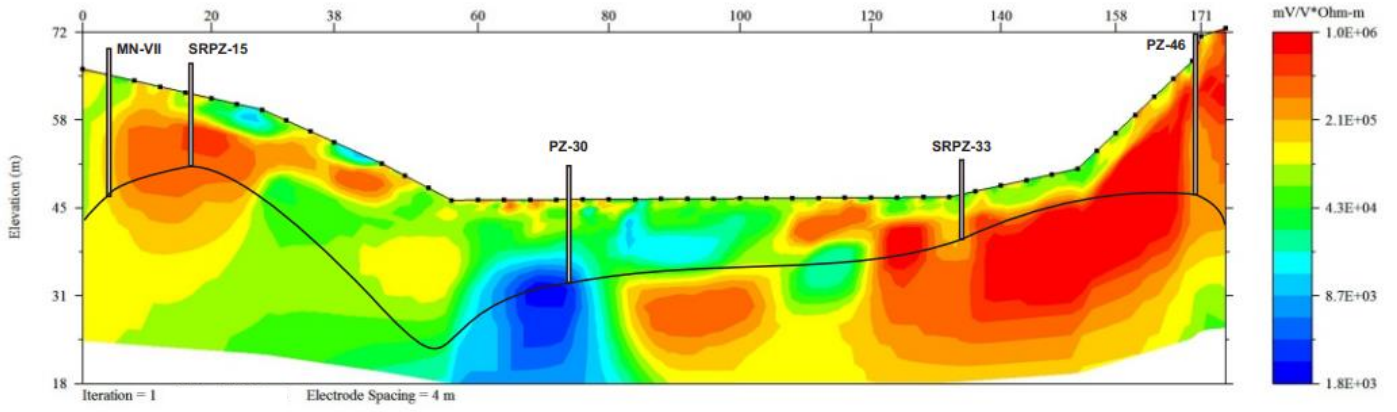
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 3 (etapa 1_B2)



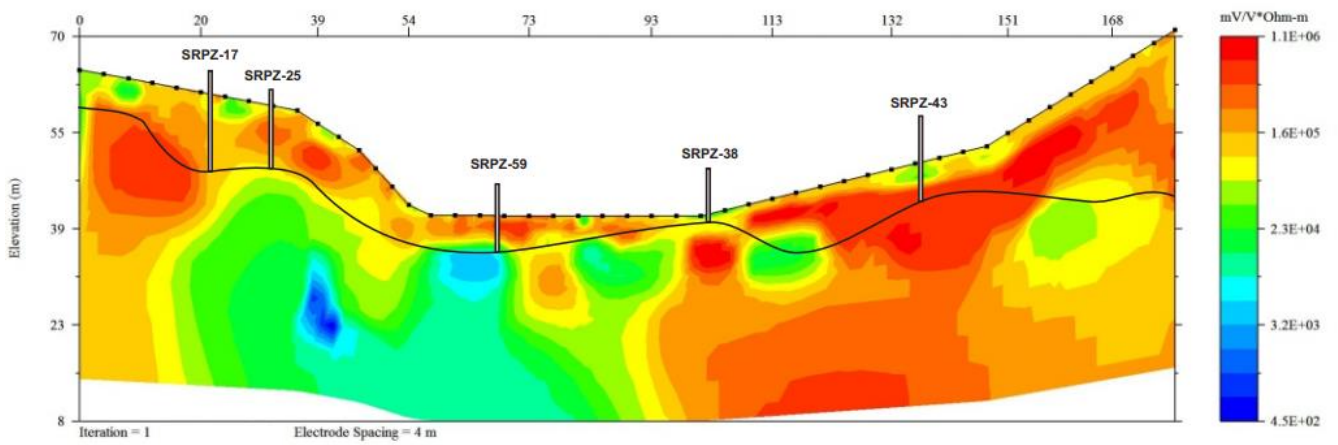
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 4 (etapa 1_B2)



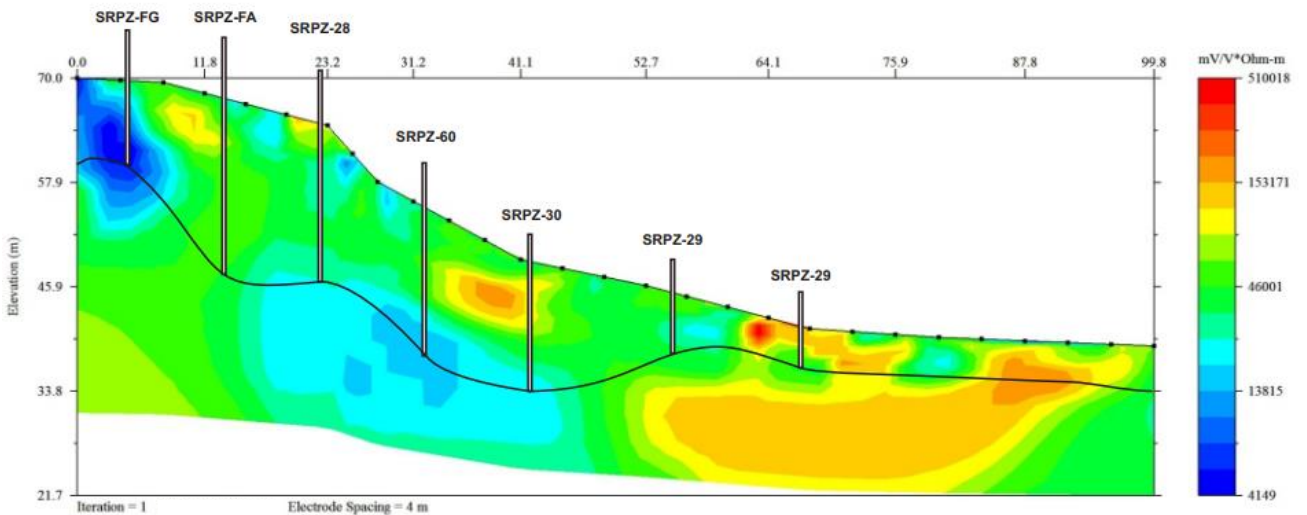
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 5 (etapa 1_B2)



Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 6 (etapa 1_B2)



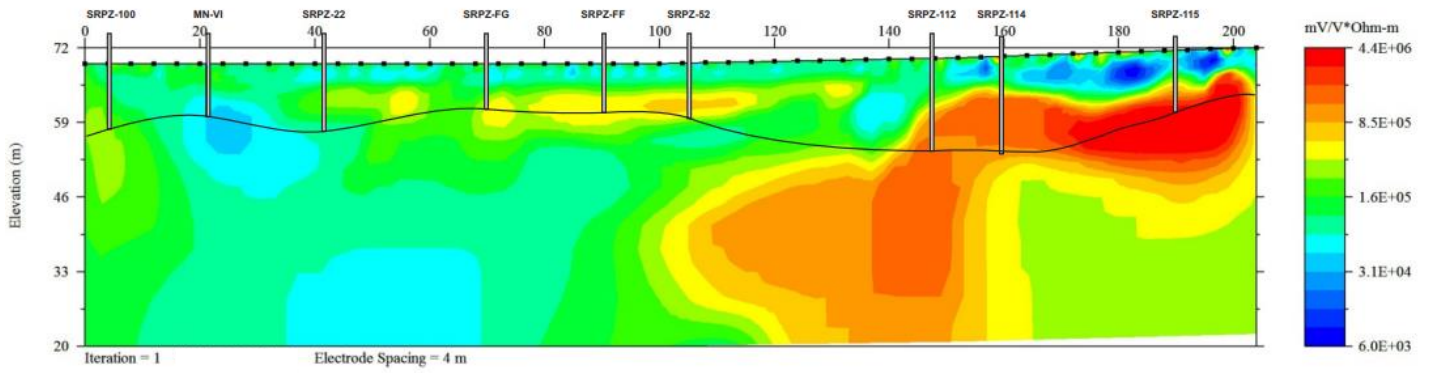
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 7 (etapa 1_B2)



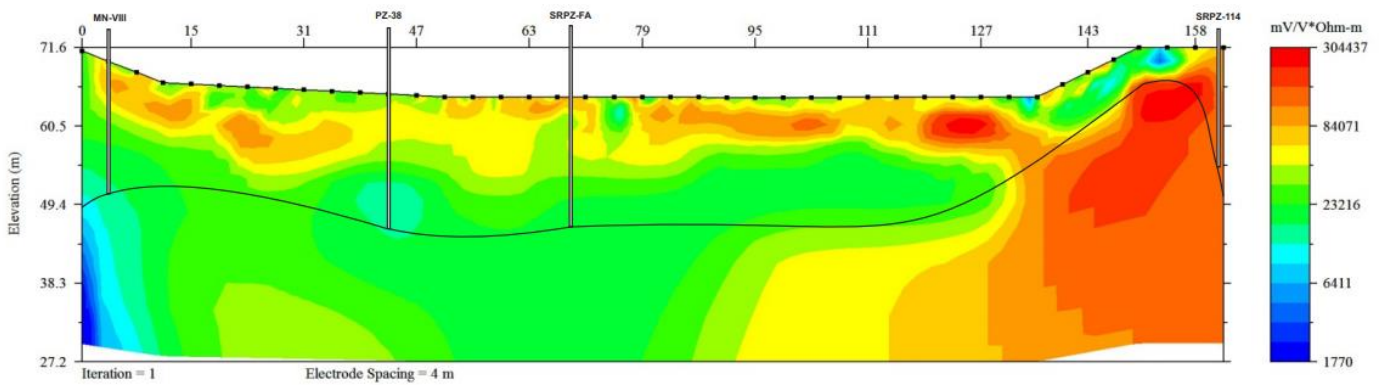
ANEXO VI

(IP etapa 2)

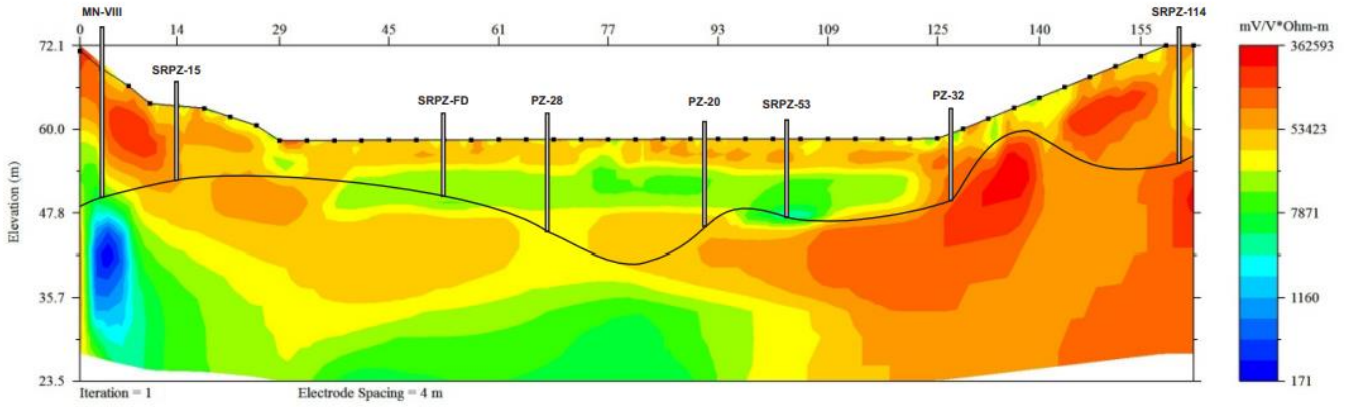
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 1 (etapa 2)



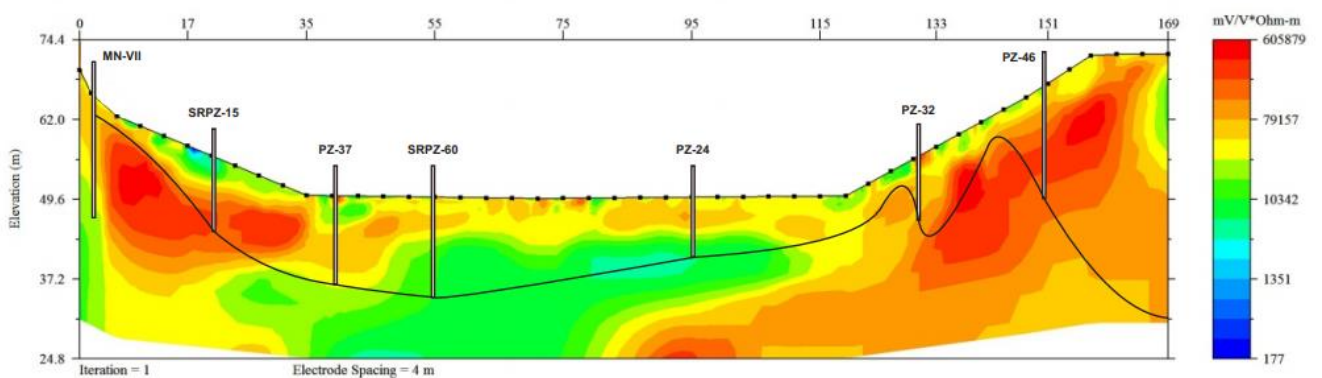
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 2 (etapa 2)



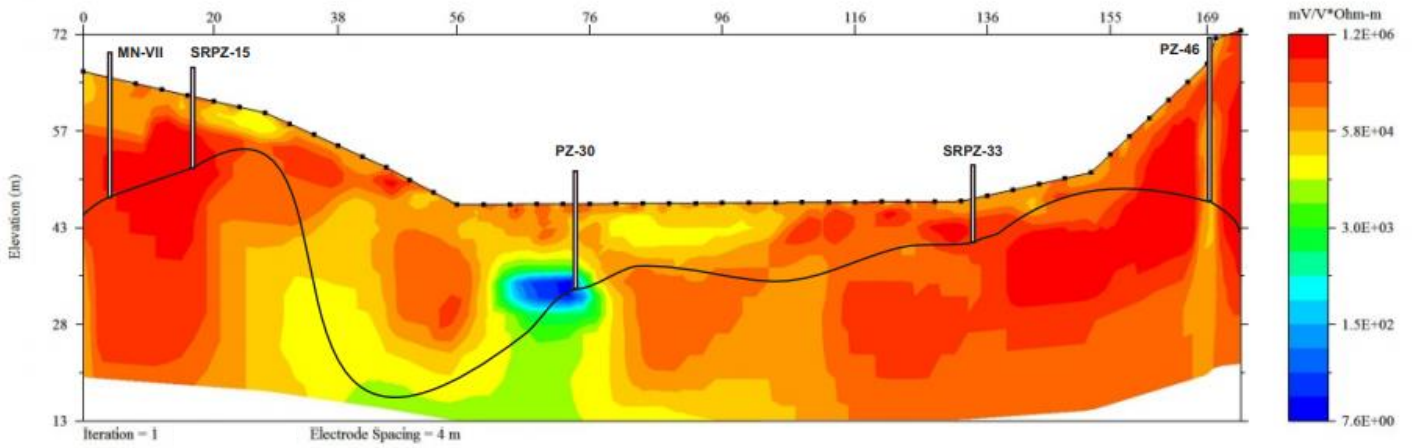
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 3 (etapa 2)



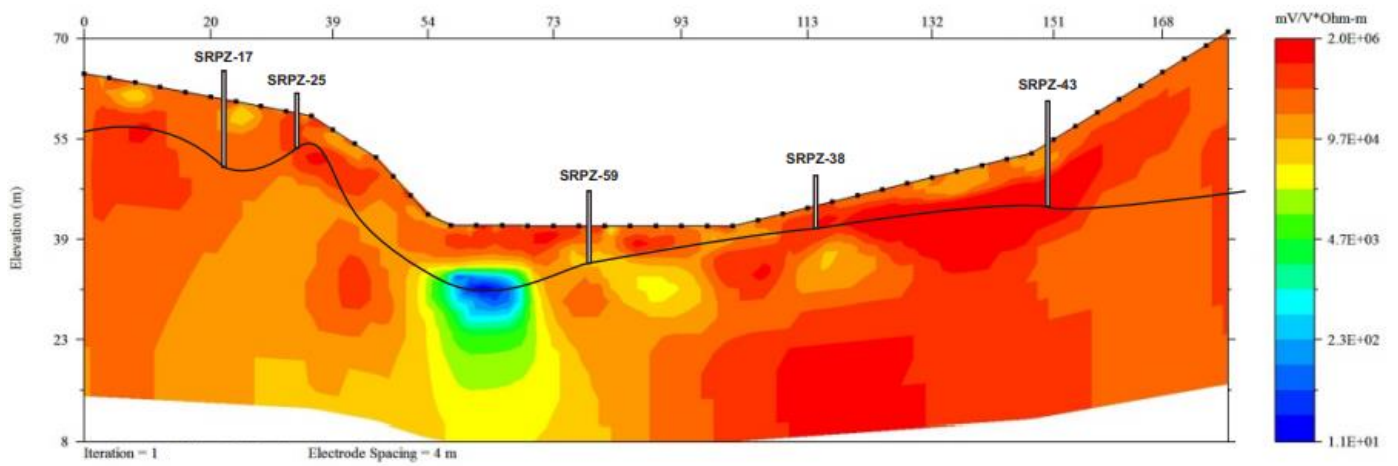
Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 4 (etapa 2)



Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 5 (etapa 2)



Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 6 (etapa 2)



Seção de Cargabilidade * Resistividade Linha 7 (etapa 2)

