



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**Camilla Tavares Rodrigues**

**Trabalho Final de Curso  
(Bacharelado em Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2018



**Camilla Tavares Rodrigues**

**GEOFÍSICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DA BARRAGEM DE REJEITO BR, DO  
COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA, MINAS GERAIS.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga -  
UFRJ

Coorientador: Demetrius Cunha Gonçalves da  
Rocha - UFRJ

Rio de Janeiro

2018

Rodrigues, Camilla Tavares

Geofísica aplicada à investigação da barragem de rejeito BR, do Complexo de Mineração de Tapira, Minas Gerais / Camilla Tavares Rodrigues. -- 2018.

x, 61 f. : il. ; 31 cm.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Graduação em Geologia, 2018.

1. Geologia. 2. IGEO – Trabalho final de Curso. I. Braga, Marco Antonio da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Geofísica aplicada à investigação da barragem de rejeito BR, do Complexo de Mineração de Tapira, Minas Gerais.

Camilla Tavares Rodrigues

**GEOFÍSICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DA BARRAGEM DE REJEITO BR, DO  
COMPLEXO DE MINERAÇÃO DE TAPIRA, MINAS GERAIS.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Marco Antonio da Silva Braga - UFRJ  
Coorientador: Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha - UFRJ

Trabalho Aprovado. Rio de Janeiro, 14 de maio de 2018:

---

**Marco Antonio Braga**

*(Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ)*

---

**Maria Filipa Perez da Gama**

*(Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ)*

---

**José Carlos Sícoli Seoane**

*(Depto. de Geologia/IGEO/UFRJ)*

Rio de Janeiro

2018

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais, Claudia e Romerio, pelo apoio incondicional ao longo de toda a graduação. A minha família, em especial aos meus avós, Vanilda, Eva, José e Rubens, por todo carinho e apoio prestado.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Marco Antonio da Silva Braga, pela grande oportunidade e privilégio de ser sua orientanda, pelo apoio ao longo desse projeto e pelos aprendizados proporcionados. Ao meu coorientador Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha por todo o apoio durante este projeto.

A equipe do Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA) pela grande troca de conhecimentos, por me ajudarem a crescer pessoalmente e profissionalmente.

A Vale S. A. e a Mosaic Fertilizantes pelo custeio e auxílio fornecido a este projeto.

A todos os professores do departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelos conhecimentos passados, pela paciência, apoio e confiança. Aos funcionários da UFRJ pelas ajudas prestadas ao longo da graduação.

E por último, agradeço meus queridos amigos que me acompanharam ao longo da minha vida, pelo apoio e encorajamento dado desde o momento em que comecei minha graduação. Aos amigos que tive a alegria de fazer na universidade, pelo companheirismo ao longo desses anos, tanto nos momentos permeados pelo estresse e angústia, quanto nos momentos de felicidade proporcionados por cada um.

Devido a participação e apoio de todos, posso encerrar uma importante etapa da minha vida e dar início a outra, sempre buscando conhecimento.

## Resumo

A barragem de rejeito BR do complexo de mineração de Tapira localiza-se no município de Tapira, região central do estado de Minas Gerais. A utilização de ensaios geofísicos no maciço da barragem BR teve como objetivo principal desenvolver uma metodologia complementar ao sistema de monitoramento direto hoje existente. Com 570 m de extensão e altura máxima de 61 m, alcançando em sua crista a cota de 1200 m, a barragem BR se caracteriza por um dique inicial constituído por solo coluvionar argiloso compactado e de cor vermelha. Os alteamentos foram feitos utilizando magnetita ciclada e rejeito de flotação, que forma a praia com mais de 100 m de extensão. Atualmente com 98.000.000 m<sup>3</sup>, o reservatório da barragem BR possui capacidade total estabelecida em projeto para 190.000.000 m<sup>3</sup>. Na aquisição foram utilizados os métodos eletrorresistividade, polarização induzida e *ground penetrating radar* (GPR). O arranjo escolhido para o caminhamento elétrico foi o Dipolo-Dipolo com o espaçamento de 3 m entre os eletrodos. Foi usada pela contratante 1 seção-tipo: D-D', que compreende leituras de 3 indicadores de nível d'água (INA's), e suas respectivas cotas de nível d'água, mostrando o delineamento inicial da freática. Zonas de baixa resistividade aparente (com valores de aproximadamente 22.5 ohm.m a 280 ohm.m) foram correlacionadas com regiões do maciço possivelmente saturadas e/ou com certo teor de umidade. Com os dados do *ground penetrating radar* (GPR) pode ser observado um padrão de truncamento dos refletores próximo à praia com a volta do paralelismo entre eles ao se aproximar da crista. Portanto, com a interpretação das seções geofísicas foi possível discernir os principais materiais constituintes da barragem e suas estruturas, bem como seu sistema de drenagem interna e saturações locais. Sendo assim, a geofísica mostrou ser uma importante ferramenta complementar de investigação e monitoramento, que associada aos métodos diretos convencionais potencializa a prevenção de problemas estruturais, que possam vir a ocorrer nas barragens.

## Abstract

The BR tailings dam of the Tapira mining complex is located in the municipality of Tapira, central region of the state of Minas Gerais. The use of geophysical tests in the BR dam massif had as main objective to develop a complementary methodology to the current monitoring system. With a length of 570 m and a maximum height of 61 m, reaching in the ridge the quota of 1200 m, the BR dam is characterized by an initial levee made up of compacted clayey colluvium soil and red. The successive raises were made using cyclone magnetite and flotation waste, which forms the beach with an extension of more than 100 m. Currently with 98,000,000 m<sup>3</sup>, the BR dam reservoir has a total installed capacity of 190,000,000 m<sup>3</sup>. In the acquisition were used the methods of electrical resistivity, induced polarization and ground penetrating radar (GPR). The array chosen for the electrical profile was the Dipole-Dipole with a 3 meter spacing between the electrodes. The contractor used 1 type-section: D-D', which comprises readings of 3 water level indicators, and their respective water level quotas, showing the initial surface of the phreatic level. Areas of low apparent resistivity (with values of approximately 22.5 ohm.m at 280 ohm.m) were correlated with possibly saturated and/or moisture content regions. With data from the ground penetrating radar (GPR), a pattern of truncation of the reflectors near the beach can be observed with the return of the parallelism between them as it approaches the ridge. Therefore, with the interpretation of the geophysical sections, it was possible to discern the main constituent materials of the dam and its structures, as well as its internal drainage system and local saturations. Thus, geophysics has proved to be an important complementary research and monitoring tool, which, combined with conventional direct methods, enables the prevention of structural problems that may occur in dams.

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Mapa com a localização do Complexo de Mineração de Tapira em relação a Belo Horizonte e mapa em detalhe do CMT, Datum: UTM WGS-1984 (Fonte: Google Earth).....	14
<b>Figura 2.</b> Esboço geológico do oeste mineiro, onde é possível observar o Complexo de Tapira intrudindo o Grupo Canastra (Fonte: Chula, 2004 <i>apud</i> Boletim 136 do DNPM).....	16
<b>Figura 3.</b> Mapa geológico simplificado da região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais, com destaque para o Grupo Canastra, modificado de Silva (2003).....	17
<b>Figura 4.</b> Organização estrutural da área de Tapira e adjacências. DN: domínio norte; DW: domínio oeste; DE: domínio leste; DS: domínio sul. (Fonte: Silva <i>et al.</i> 2012).....	19
<b>Figura 5.</b> Parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica (Fonte: Elis, 2014).....	21
<b>Figura 6.</b> Arranjo dipolo-dipolo (Fonte: Braga, 2006).....	22
<b>Figura 7.</b> Curva de descarga IP no domínio do tempo (Fonte: Braga, 2006).....	23
<b>Figura 8.</b> Sobretensão de uma partícula metálica submergida em um eletrólito (Fonte: Orellana, 1974 <i>apud</i> Braga, 2006).....	24
<b>Figura 9.</b> Polarização de membrana. (a) meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico. (b) meio poroso após a aplicação de um campo elétrico (Fonte: Ward, 1990 <i>apud</i> Braga, 2006).....	24
<b>Figura 10.</b> Aquisição pelo método de GPR (Fonte: modificado de Neal, 2004).....	27
<b>Figura 11.</b> Vista geral da Barragem BR e seu reservatório (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).....	28
<b>Figura 12.</b> Seção representativa do maciço da Barragem BR (Fonte: MOSAIC, 2017a).....	28
<b>Figura 13.</b> A) material do corpo da barragem composto por areia de magnetita; B) Rejeito de flotação que constitui a praia da barragem (Fonte: MOSAIC, 2017b).....	29

<b>Figura 14.</b> Visão em planta do tapete drenante e dos 14 drenos de encosta instalados na Barragem BR.....	30
<b>Figura 15.</b> Situação atual da Barragem BR, onde é possível observar na ombreira direita o canal extravasor.....	30
<b>Figura 16.</b> A) Aquisição de caminhamento elétrico (Linha 05) com vista para sul em sentido a ombreira esquerda; B) Aquisição de caminhamento elétrico (Linha 01) na praia com vista para o norte em sentido a ombreira direita (Fonte: MOSAIC, 2017b).....	32
<b>Figura 17.</b> Linhas executadas para o caminhamento elétrico.....	33
<b>Figura 18.</b> Equipamento utilizado na aquisição de CE– Resistivímetro ( <i>SuperSting</i> ) (Fonte: MOSAIC, 2017b).....	34
<b>Figura 19.</b> Aquisição de GPR realizada na região da crista do barramento (Fonte: MOSAIC, 2017b).....	35
<b>Figura 20.</b> Linhas executadas para o <i>ground penetrating radar</i> .....	36
<b>Figura 21.</b> Localização dos os instrumentos de monitoramento direto e da seção-tipo.....	37
<b>Figura 22.</b> Superfície freática inferida com o auxílio dos indicadores de nível d'água.....	38
<b>Figura 23.</b> ZBR: Zonas de Baixa Resistividade aparente; ZIR: Zonas de Resistividade aparente Intermediárias; ZAR: Zonas de Alta Resistividade aparente (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).....	39
<b>Figura 24.</b> ZBC: Zonas de baixa cargabilidade aparente; ZIC: Zonas de cargabilidade aparente intermediárias; ZAC: Zonas de alta cargabilidade aparente (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).....	39
<b>Figura 25.</b> Localização da linha de aquisição 01 de CE.....	40
<b>Figura 26.</b> Seção Linha 01 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.....	42
<b>Figura 27.</b> Seção Linha 01 de polarização induzida.....	42

<b>Figura 28.</b> Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 01, na seção-tipo.....	43
<b>Figura 29.</b> Localização da linha de aquisição 04 de CE.....	44
<b>Figura 30.</b> Seção Linha 04 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.....	45
<b>Figura 31.</b> Seção Linha 04 de polarização induzida.....	45
<b>Figura 32.</b> Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 04, na seção-tipo.....	46
<b>Figura 33.</b> Localização da linha de aquisição 07 de CE.....	46
<b>Figura 34.</b> Seção Linha 07 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.....	48
<b>Figura 35.</b> Seção Linha 07 de polarização induzida.....	48
<b>Figura 36.</b> Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 07, na seção-tipo.....	49
<b>Figura 37.</b> Mapa de localização da linha de aquisição 01 de GPR.....	50
<b>Figura 38.</b> Seção de GPR da linha 01 com destaque para o truncamento dos refletores.....	51
<b>Figura 39.</b> Mapa de localização da linha de aquisição 04 de GPR.....	52
<b>Figura 40.</b> Seção 04 de GPR, com destaque para os horizontes com diferentes padrões de refletores.....	53
<b>Figura 41.</b> Mapa de localização da linha de aquisição 07 de GPR.....	54
<b>Figura 42.</b> Seção 07 de GPR com três horizontes com padrões distintos de refletores, tendo continuidade lateral e espessura aproximadamente constante.....	55
<b>Figura 43.</b> Comparação entre os horizontes das seções 04 de GPR e caminhamento elétrico.....	57

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Valores de cargabilidade em diversos tipos litológicos (Fonte: Braga, 1999).....	25
<b>Tabela 2.</b> Frequência das antenas de GPR e suas respectivas profundidades de penetração máxima (Porsani, 1999).....	26
<b>Tabela 3.</b> Resumo das características gerais da barragem BR fornecidas pela Mosaic (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).....	31
<b>Tabela 4.</b> Comprimento das linhas de aquisição do caminhamento elétrico.....	33
<b>Tabela 5.</b> Comprimento das linhas de aquisição do método GPR.....	35
<b>Tabela 6.</b> Coordenadas e cotas dos indicadores de nível d'água de monitoramento direto.....	38

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	13
<b>3</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	14
<b>4</b>	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	15
4.1	Contexto geológico.....	15
4.2	Contexto estrutural.....	15
4.3	Organização estrutural.....	18
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS</b> .....	20
5.1	Eletrorresistividade.....	20
5.2	Polarização induzida.....	23
5.3	<i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i> .....	25
<b>6</b>	<b>DESCRIÇÃO DA BARRAGEM</b> .....	27
6.1	Dados gerais.....	27
<b>7</b>	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS</b> .....	32
7.1	Caminhamento elétrico.....	32
7.2	<i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i> .....	34
<b>8</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	36
8.1	Seções-tipo.....	36
8.2	Caminhamento elétrico - análise de dados.....	39
8.2.1	Seção linha 01.....	40
8.2.2	Seção linha 04.....	43
8.2.3	Seção linha 07.....	46
8.3	<i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i> - análise de dados.....	49
8.3.1	Seção linha 01.....	49
8.3.2	Seção linha 04.....	52
8.3.3	Seção linha 07.....	54
8.4	Correlação GPR-Eletrorresistividade.....	56
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	58
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

## **1. INTRODUÇÃO**

A mineração é um setor básico da economia brasileira, tendo sua atividade distribuída em larga escala pelo território nacional. Essas atividades, em questão, geram grandes quantidades de resíduos sólidos, na forma de estéreis ou rejeitos, que necessitam ser armazenados de forma correta, para tal fim são construídas estruturas de contenção, denominadas barragens.

As barragens possuem dimensões variadas, determinadas de forma a conter o volume de resíduo produzido em uma determinada atividade minerária, podendo sofrer alteamentos, ao longo de sua vida útil, para aumentar sua capacidade de armazenamento. Em consequência desse aumento na capacidade de armazenamento de seus reservatórios, qualquer alteração na estrutura de uma barragem pode gerar grandes prejuízos.

Devido a periculosidade dos acidentes envolvendo essas estruturas, é necessário prover um monitoramento correto e eficiente, que assegure a integridade e segurança física e operacional da barragem.

O monitoramento direto, com piezômetros, indicadores de nível d'água, entre outros instrumentos, utilizados usualmente em barragens, apesar de sua eficiência, promovem o monitoramento pontual. A fim de aumentar a eficácia deste monitoramento, este trabalho propõe a utilização de métodos geofísicos em conjunto com este monitoramento direto. Esses métodos geofísicos geram imagens contínuas da subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem, contribuindo na avaliação da estrutura.

## **2. OBJETIVO**

Em vista do contexto apresentado, o objetivo principal deste trabalho é demonstrar como a geofísica pode fornecer uma instrumentação complementar ao monitoramento direto já existente sobre a barragem estudada. Além de executar um mapeamento subterrâneo indireto ao longo do maciço e das ombreiras da barragem, a fim de discernir seus principais materiais constituintes, tal como seu sistema de drenagem interna, e identificar possíveis saturações locais e percolações de fluido.

### 3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na Barragem BR, pertencente ao Complexo de Mineração de Tapira (CMT), que se localiza na rodovia MG – 341 na Fazenda Boa Vista no município de Tapira, no estado de Minas Gerais. A coordenada UTM (Zona 23) do centro de crista da barragem é  $E = 308.045 / N = 7.805.260$ .

O Complexo de Mineração de Tapira está situado a oeste de Belo Horizonte (figura 1), a aproximadamente 400 quilômetros de distância da capital mineira. É atualmente, a maior mineração de rocha fosfática da América Latina, com capacidade produtiva de 2.170.000 t/ano. Suas atividades foram iniciadas em 1979 e no presente produz rocha fosfática convencional e ultrafino (VALE FERTILIZANTES, 2017).

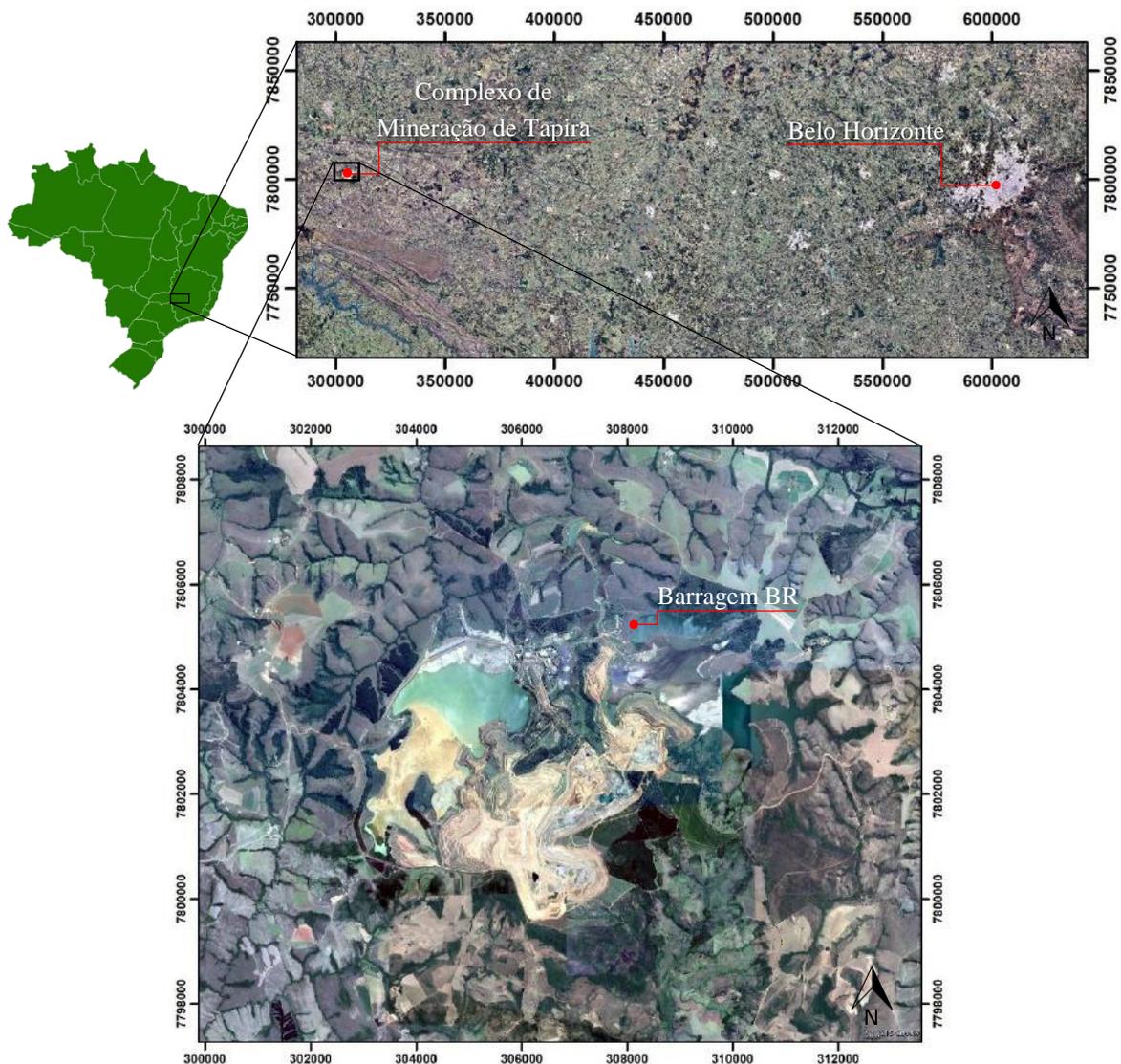


Figura 1 – Mapa com a localização do Complexo de Mineração de Tapira em relação a Belo Horizonte e mapa em detalhe do CMT, Datum: UTM WGS-1984 (Fonte: Google Earth).

## **4. GEOLOGIA REGIONAL**

### **4.1. Contexto geológico**

A região de Tapira é marcada por um Complexo ultramáfico-carbonatítico-alcalino relacionado a um evento magmático que afetou a plataforma brasileira, do fim do Jurássico ao Terciário Inferior. O Complexo possui uma área de 35 km<sup>2</sup>, onde os eixos NS e EW possuem aproximadamente 6,5 x 5,5 Km, respectivamente (CHULA, 2004).

Os complexos alcalinos são feições essencialmente continentais, e são reconhecidas em todos os continentes, situando-se em regiões de reativação tectono-magmática em crátons e em faixas de dobramentos estabilizadas (LAPIN *et al.*, 1999 *apud* CHULA, 2004). Suas idades variam desde o Pré-cambriano até o Cenozoico. Segundo Hasui & Cordani (1968) *apud* Chula (2004), o Complexo de Tapira apresenta a idade de aproximadamente 70 Ma (Cretáceo Superior), obtida por biotita de rocha ultrabásica.

Com forma aproximadamente circular e dimensões variadas, os complexos carbonatíticos-alcalinos, no Brasil, são intrusivos em rochas do embasamento Pré-cambriano, tais como gnaisses, granitos, granodioritos, xistos e quartzitos. O Complexo de Tapira está encaixado nos metassedimentos pré-cambrianos do Grupo Canastra (figura 2), que são cortados por abundantes veios. Essas rochas intrudidas pelo Complexo correspondem a porção externa da Faixa Brasília, um orógeno colisional produto da interação entre os crátons São Francisco-Congo e Paranapanema (SILVA *et al.* 2012).

A região do Complexo de Mineração de Tapira é caracterizada por um conjunto de rochas do Grupo Canastra (figura 2) que são formados, segundo Dardenne (2000) *apud* Silva *et al.* (2012), por quartzitos e filitos e, subordinadamente, por rochas carbonáticas e carbonáceas, metamorfizadas em fácies xisto verde.

### **4.2. Contexto estrutural**

Na região de Tapira, o Grupo Canastra apresenta grande complexidade tectônica. Silva (2003) descreve seis fases de deformação atuantes na região, com base em critérios de superposição.

A Fase D1 possui uma única feição relacionável, uma xistosidade reconhecida com segurança, denominada de S1. Esta xistosidade contínua é definida pela orientação de muscovita, biotita, grafita e opacos que em conjunto com o S0 desenham as charneiras das dobras (SILVA, 2003).

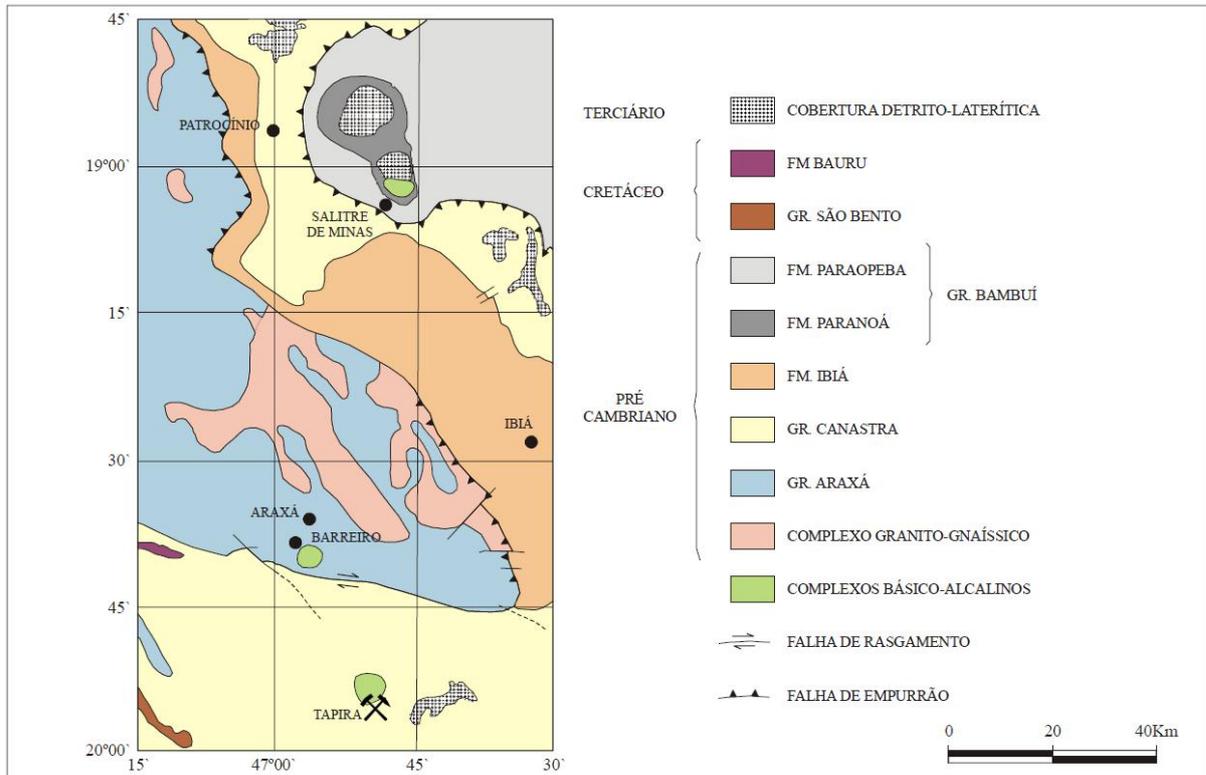


Figura 2 – Esboço geológico do oeste mineiro, onde é possível observar o Complexo de Tapira intrudindo o Grupo Canastra (Fonte: Chula, 2004 *apud* Boletim 136 do DNPM).

A principal estrutura da fase D2 é a foliação S2, marcada pela orientação preferencial de minerais placóides tais como: micas, grafita, ilmenita, feldspato, e mais raramente quartzo. A foliação S2 é o plano axial das dobras D2, e é definida como uma clivagem de crenulação que incorpora o acamamento sedimentar (S0) e a xistosidade S1 (SILVA, 2003). Também é possível observar associado a fase de deformação D2 falhas de empurrão, responsáveis pela justaposição de rochas de diferentes graus metamórficos (SILVA *et al.* 2012). De modo a simplificar, Silva *et al.* (2012) se refere a foliação composta S0//S1//S2 como S2c.

Durante a fase D3, foram geradas dobras de escala quilométrica, que são responsáveis pela estruturação de grande parte da área. Essas dobras são abertas e normais, contendo plano axial com atitude variando de N45 a 85W e mergulhos verticais. As linhas de charneira apresentam caimentos suaves entre 1 e 5° para NW-SE ou E-W (SILVA *et al.* 2012). Estas dobras são as principais responsáveis pelo

padrão de superposição das estruturas, gerado pela verticalização dos planos S2c (SILVA, 2003).

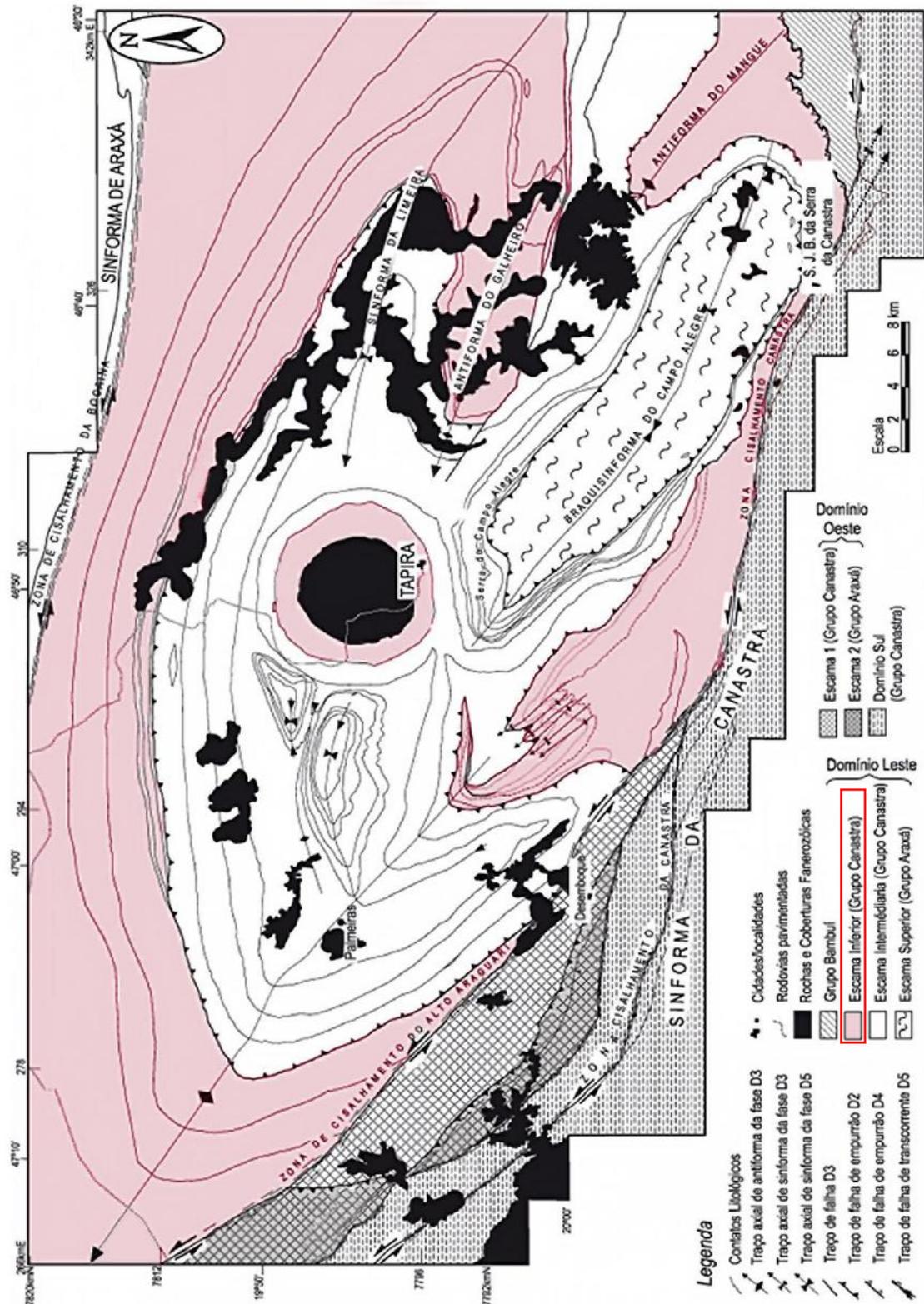


Figura 3 - Mapa geológico simplificado da região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais, com destaque para o Grupo Canastra, modificado de Silva (2003).

A fase D4 possui como sua principal estrutura uma foliação de baixo ângulo (S4), que afeta as estruturas preexistentes, e é orientada geralmente em N43W/30SW. Lineações de estiramento e/ou mineral, definidas pela orientação de minerais inequidimensionais como muscovita e turmalina, também são estruturas importantes relacionadas a esta fase, pois indicam a direção de transporte tectônico em direção ao cráton do São Francisco (SILVA, 2003).

As crenulações são as feições mais comuns relacionadas a fase D5, essas se apresentam como dobras abertas, normais a inclinadas, simétricas ou, mais comumente assimétricas, com planos axiais íngremes mergulhando para SW ou NE, com atitude preferencial de N47W/83NE (SILVA, 2003). Relacionadas ainda a esta fase associam-se três zonas de cisalhamento, de direções variadas, de escala regional, a Zona de Cisalhamento do Alto Araguari, a Zona de Cisalhamento da Canastra e a Zona de Cisalhamento da Bocaina (figura 3). Todas são essencialmente direcionais, com caráter dúctil-rúptil e mergulhos verticais a subverticais (SILVA *et al.* 2012).

A fase D6 é caracterizada por dobras abertas, normais a inclinadas, de escala centimétrica e ocorrência local com eixos orientados na direção N-S com caimentos íngremes a suaves, com atitude preferencial de N05W/05. Os planos axiais das crenulações D6 são íngremes com mergulhos íngremes para E ou W, sendo a atitude preferencial desses planos de N50W/90 (SILVA, 2003).

### **4.3. Organização estrutural**

Devido à complexidade estrutural da região, Silva *et al.* (2012) compartimentou a região em quatro domínios tectono-estruturais (figura 4): o domínio norte (DN), domínio oeste (DW), domínio leste (DE) e o domínio sul (DS).

O DN corresponde a uma sucessão psamopelítica, com predominância de quartzitos, e é separado dos domínios DW e DE pela Zona de Cisalhamento Bocaina. O DW é marcado pela predominância de xistos e quartzitos e rochas metamáficas, metaultramáficas e gnáissicas subordinadamente. O limite leste deste domínio é marcado pela Zona de Cisalhamento do Alto Guarani. A leste desta zona ocorre o DE, que foi definido pelo conjunto de três escamas distintas delimitadas por falhas de empurrão, que se sobrepõe ao Grupo Bambuí. Neste domínio predominam xistos, com intercalações de quartzitos, quartzo xisto e rochas metaultramáficas. E é no DE

que está situado o Complexo de Mineração de Tapira. A Zona de Cisalhamento da Canastra separa o DE do DS, que é marcado pela predominância de rochas metapsamíticas.

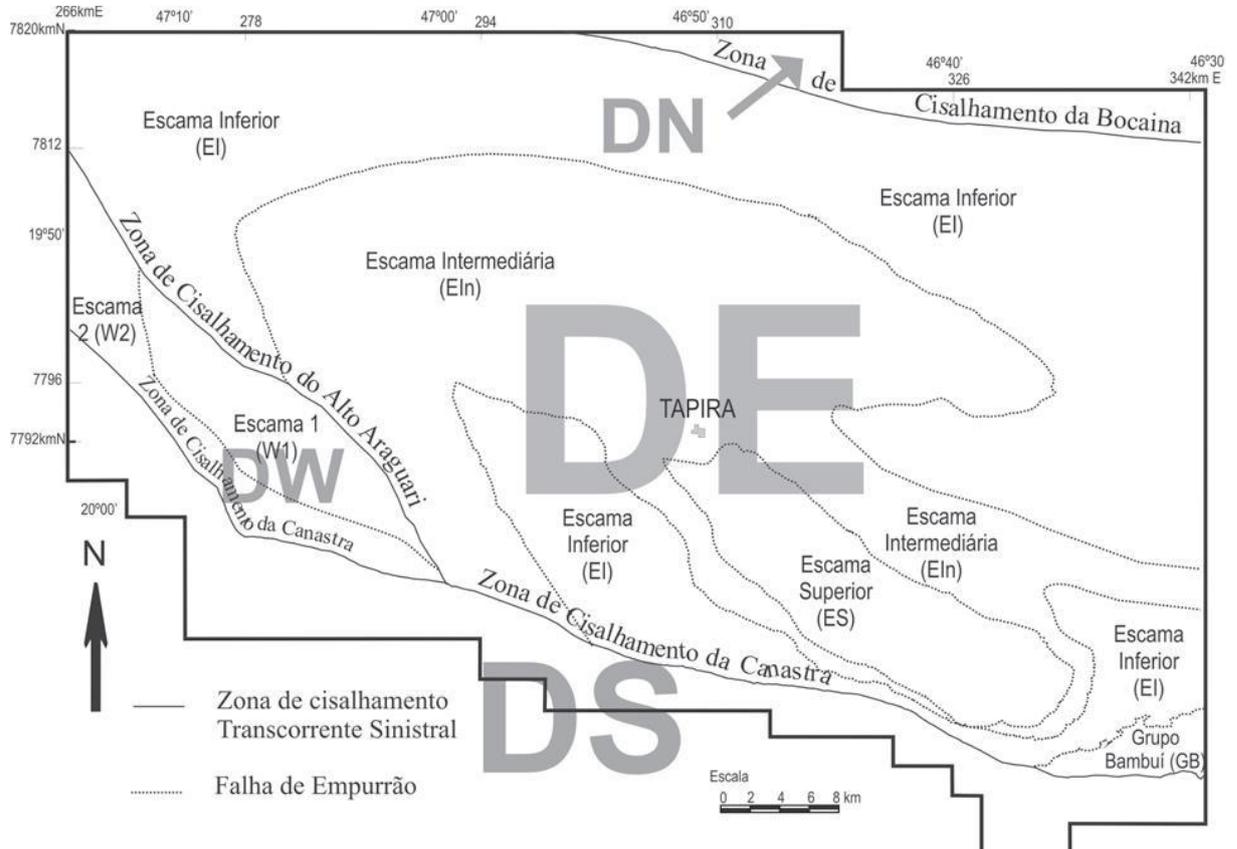


Figura 4 – Organização estrutural da área de Tapira e adjacências. DN: domínio norte; DW: domínio oeste; DE: domínio leste; DS: domínio sul. (Fonte: Silva *et al.* 2012).

## 5. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

A aquisição geofísica realizada neste trabalho utilizou os métodos de eletrorresistividade, polarização induzida e *ground penetrating radar* (GPR).

O objetivo foi executar um mapeamento subterrâneo indireto ao longo do maciço e das ombreiras, a fim de discernir os principais materiais constituintes da barragem, bem como seu sistema de drenagem interna, saturações locais e percolações eventuais. Com os dados obtidos pelas 10 seções adquiridas, teve-se por finalidade realizar uma comparação com os dados obtidos pelos instrumentos de monitoramento direto, providenciando assim uma metodologia complementar a estes.

### 5.1. Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método que emprega uma corrente artificial, introduzida por dois eletrodos (denominados A e B) em um terreno, com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) na proximidade dos fluxos de corrente, permitindo assim determinar a resistividade real ou aparente em subsuperfície (LAGO *et al.* 2006). Neste trabalho este método foi executado através do arranjo dipolo-dipolo, que possibilita a utilização de diversos eletrodos de recepção (M e N) ao longo da linha de aquisição.

Elis (2014) define a resistividade como a resistência dos materiais a conduzir corrente elétrica, sendo assim, o inverso da condutividade. Essa propriedade física depende basicamente da composição, granulometria, porosidade, compactação, grau de saturação, temperatura e salinidade da água que preenche vazios (poros ou fraturas) de rochas.

Materiais arenosos, compostos por quartzo, são geralmente mais resistivos. Materiais argilosos tendem a ser bons condutores de corrente elétrica quando possuem água dentre seus poros. De modo geral, quanto maior a porosidade menor a resistividade.

A água possui grande influência sobre a resistividade, zonas saturadas são mais condutivas do que zonas não saturadas. E quanto mais sais dissolvidos na água menor será a resistividade.

Sendo assim, a resistência depende da natureza e do estado físico do material, podendo ser expressa, em laboratório, na forma da resistência de um cilindro condutor e homogêneo (figura 5), cuja área e comprimento apresentam dimensões unitárias.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}$$

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica (ohm.m);

$R$  = resistência elétrica (ohm);

$S$  = área da seção transversal do cilindro (m<sup>2</sup>);

$L$  = comprimento do cilindro (m).

Sendo a cilindro atravessado por uma corrente ( $I$ ), será submetido a uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ), e sua resistência será:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \text{ (ohm)}$$

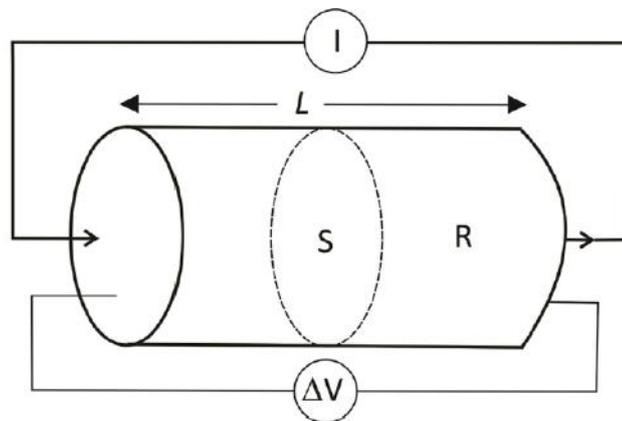


Figura 5 – Parâmetros utilizados na definição de resistividade elétrica (Fonte: Elis, 2014).

Em campo, uma corrente é injetada por dois eletrodos (A e B) em uma superfície plana de um semi espaço homogêneo e isotrópico, e é medida por dois eletrodos (M e N) na forma de diferença de potencial, como resultado a resistividade é assumida como uma constante e pode ser calculada através da expressão:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{S}{L} \text{ (ohm.m)}$$

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica (ohm.m);

$K = S/L =$  fator geométrico;

$\Delta V =$  diferença de potencial entre os eletrodos M e N;

$I =$  intensidade de corrente que passa entre eletrodos A e B;

Sendo K, um fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos no terreno e pode ser calculado para qualquer arranjo pela fórmula:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) + \left(\frac{1}{BN}\right)} (m)$$

No método de eletrorresistividade existem diversas maneiras de aplicação do ensaio, como a sondagem vertical e o caminhamento elétrico, as quais compreendem uma grande variedade de configurações eletrolíticas, o que lhe confere um grande grau de versatilidade (LAGO *et al.* 2006).

Nesse trabalho o arranjo escolhido foi o Dipolo-Dipolo. Nesse arranjo podem-se utilizar simultaneamente vários dipolos de recepção (MN) disposto ao longo da linha a ser levantada. Cada dipolo MN corresponde a um nível de investigação (figura 6). A profundidade teórica atingida em cada nível investigado é tomada, como sendo  $Z = R/2$  (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se formada como sendo aproximadamente R/4 (BRAGA, 2006).

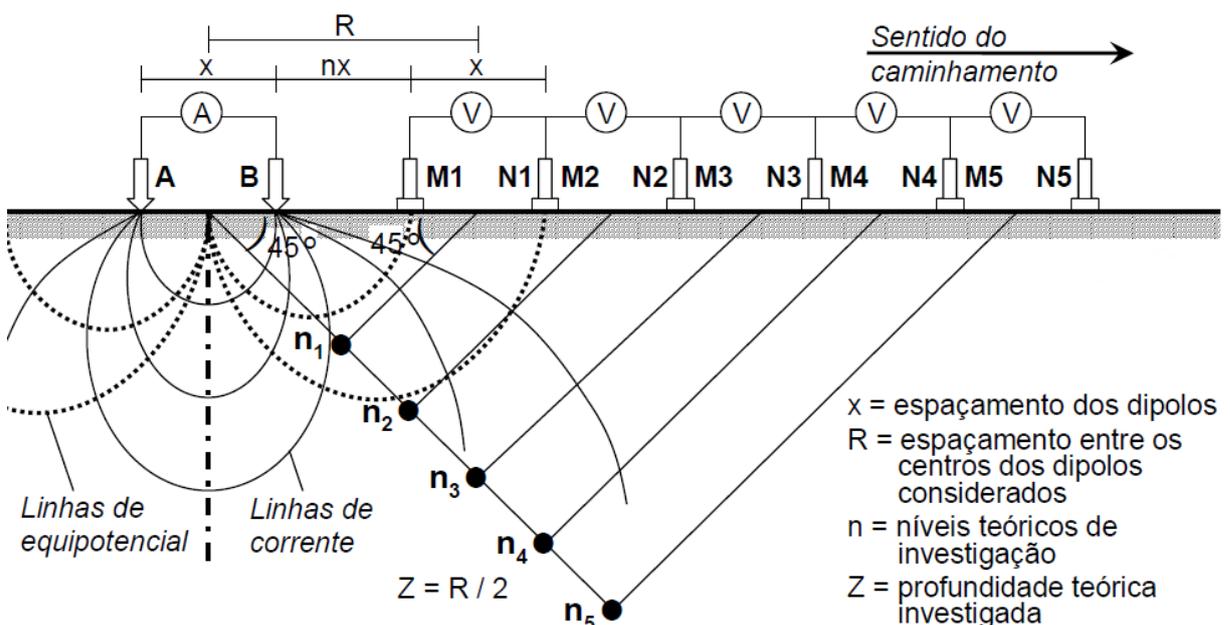


Figura 6 - Arranjo dipolo-dipolo (Fonte: Braga, 2006).

## 5.2. Polarização Induzida

Polarização Induzida é um fenômeno com correntes elétricas estimuladas observadas como a resposta de uma voltagem atrasada em materiais terrestres. Refere-se a uma ação de bloqueio resistivo ou a uma polarização elétrica em materiais terrestres, sendo o processo mais pronunciado em poros cheios de líquido ao lado de minerais metálicos (SUMNER, 1976).

A resposta da polarização induzida é uma quantidade, com dimensões, muito reduzida, sendo na prática medida tal como a variação de voltagem em função do tempo ou frequência, denominados, respectivamente, com IP-domínio do tempo e IP-domínio da frequência.

No domínio do tempo, ao se aplicar uma corrente elétrica no solo, através de dois eletrodos (denominados A e B), cria-se uma diferença de potencial primária  $\Delta V$ , e conseqüentemente uma polarização no mesmo. Essa diferença de potencial primária ( $\Delta V_p$ ) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Ela varia com o tempo na forma de uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ . Esta curva, liga a assíntota  $\Delta V_p$  em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente (figura 7). A amplitude de um valor  $\Delta V_{IP}(t)$  está diretamente ligada a maior ou menor capacidade que os terrenos têm de se polarizarem, constituindo-se, portanto, na base do método (BRAGA, 2006).

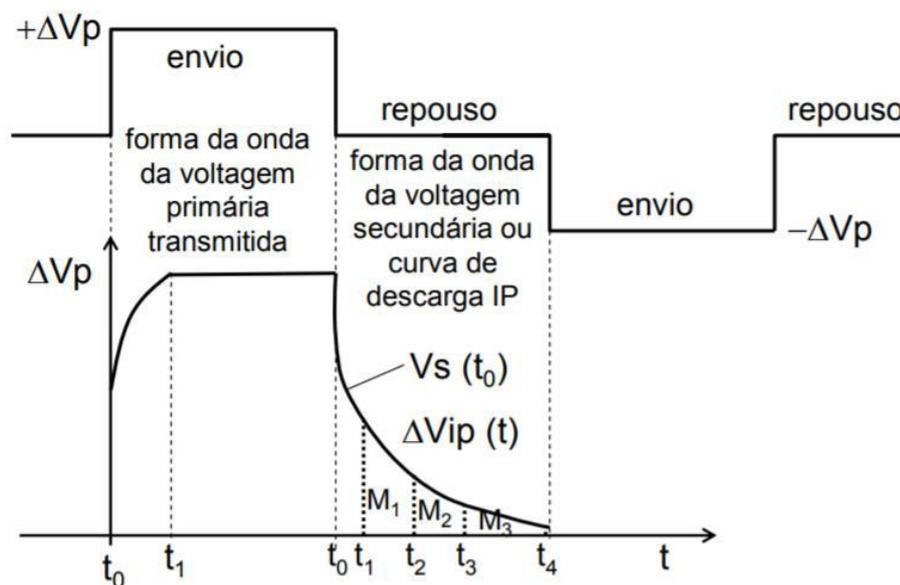


Figura 7 – Curva de descarga IP no domínio do tempo (Fonte: Braga, 2006).

Acredita-se que a polarização induzida possui duas origens, a polarização metálica ou eletrônica e a polarização de membrana. Segundo Braga (2006), a primeira ocorre na superfície de um corpo ou partícula submetida a corrente elétrica, como indicado na figura 8, onde tem-se uma passagem da condução iônica para a eletrônica e vice-versa. Tendo assim, nas duas superfícies opostas do corpo a produção da concentração de íons, que não cedem ou tomam carga do corpo. Quando a corrente é cortada, a distribuição de íons se modifica e volta ao seu estado inicial, levando para isto um certo tempo, durante o qual existe a polarização do corpo.

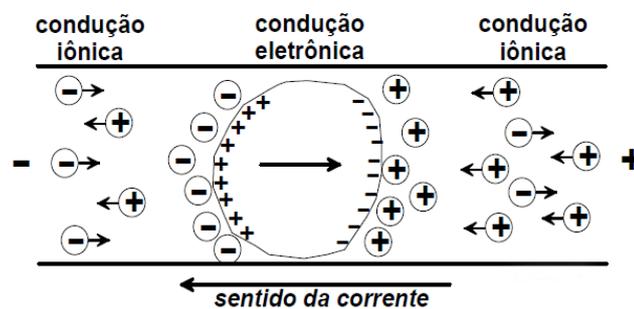


Figura 8 - Sobretensão de uma partícula metálica submersa em um eletrólito (Fonte: Orellana, 1974 *apud* Braga, 2006).

A segunda ocorre em rochas carentes de substâncias metálicas, e é devido a uma diferença de mobilidade entre ânions e cátions produzida pela presença de minerais de argila. Tais minerais se carregam negativamente, atraindo uma "nuvem catiônica" que permite a passagem dos portadores positivos, mas não dos negativos, exercendo o efeito de uma membrana (figura 9). Assim, são produzidos gradientes de concentração, que levam um tempo a desaparecer depois de suprimida a tensão exterior, e que originam, portanto, uma sobretensão residual (BRAGA, 2006).

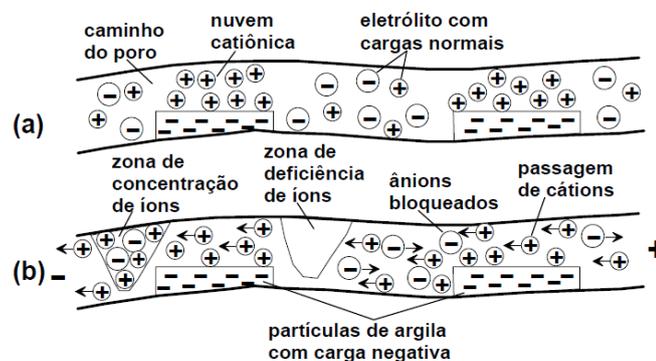


Figura 9 - Polarização de membrana. (a) meio poroso antes da aplicação de um campo elétrico. (b) meio poroso após a aplicação de um campo elétrico (Fonte: Ward, 1990 *apud* Braga, 2006).

A cargabilidade (M) é o parâmetro medido pelo IP no domínio do tempo, e pode ser expressa em % ou mV/V, ou ainda em msec.

$$M = \frac{\Delta V_{ip} \times 1000}{\Delta V_p} \quad (\text{mV/V})$$

Caso o meio onde a aquisição está ocorrendo, seja homogêneo, qualquer das magnitudes definidas acima podem ser utilizadas como a medida de sua polarização verdadeira. Já em um meio heterogêneo, o parâmetro resultante das medidas, no IP-domínio do tempo, é denominado de cargabilidade aparente (Ma) (BRAGA, 2006).

A composição de um material e sua saturação em água possuem influência sobre a cargabilidade obtida em uma aquisição de potencial espontâneo. Na tabela 1, é possível observar esta variação de valores segundo Braga (1999).

Tabela 1 - Valores de cargabilidade em diversos tipos litológicos (Fonte: Braga, 1999).

<b>Tipo Litológico</b>	<b>Cargabilidade (mV/V)</b>
Zona não saturada	0,4 a 23,4
Argiloso	1,5 a 1,9
Argilo-Arenoso	1,5 a 1,9
Areno-Argiloso	7,1 a 45,0
Siltito Argiloso	7,1 a 45,0
Siltito Arenoso	0,1 a 5,8
Arenoso	0,1 a 5,8
Argilito	1,5 a 1,9
Arenito	0,1 a 5,8
Basalto/Diabásio	20,0 a 30,0
Calcário	20,0 a 30,0
Granito/Gnaiss	10,0 a 20,0

### **5.3. Ground Penetrating Radar (GPR)**

O *ground penetrating radar* (GPR) é uma técnica de levantamento geofísico não-invasivo, não destrutivo que é usada para produzir uma visão transversal dos objetos que estão em subsuperfície. Todas as unidades de GPR são constituídas de

três componentes: a fonte de energia, a unidade de controle e antena (DESAI *et al.* 2016).

Um escaneamento é promovido pelo GPR ao se passar a antena linearmente sobre a superfície, criando uma série de pulsos eletromagnéticos sobre esta área (figura 10). Durante o escaneamento, a unidade de controle produz e regula os pulsos de energia do radar, que é amplificado e transmitido para a subsuperfície pela antena (DESAI *et al.* 2016). Sendo que, a frequência da antena é inversamente proporcional a profundidade alcançada, o que torna a seleção da antena o passo mais importante no desenvolvimento da pesquisa (tabela 2).

Tabela 2 – Frequência das antenas de GPR e suas respectivas profundidades de penetração máxima (Porsani, 1999).

<b>Frequência central (MHz)</b>	<b>Profundidade máxima de penetração (m)</b>
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

A unidade de controle grava a força e o tempo necessário para qualquer energia refletida retornar ao sistema. A forma como a energia responde a cada material é determinada pela constante dielétrica e a condutividade elétrica.

A constante dielétrica determina o quão rápido a energia eletromagnética viaja através de um material. Quanto maior a dielétrica, mais devagar será a movimentação da energia eletromagnética em um material (DESAI *et al.* 2016).

O intervalo de profundidade alcançado é limitado pela condutividade elétrica do solo, pela frequência central e a potência irradiada. Conforme a condutividade aumenta, a profundidade de penetração diminui. Isso ocorre porque a energia eletromagnética é mais rapidamente dissipada no calor, causando perda de

intensidade do sinal em profundidade. As maiores frequências não penetram tanto quanto as menores frequências, mas possuem melhor resolução (KRAINER, 2011).

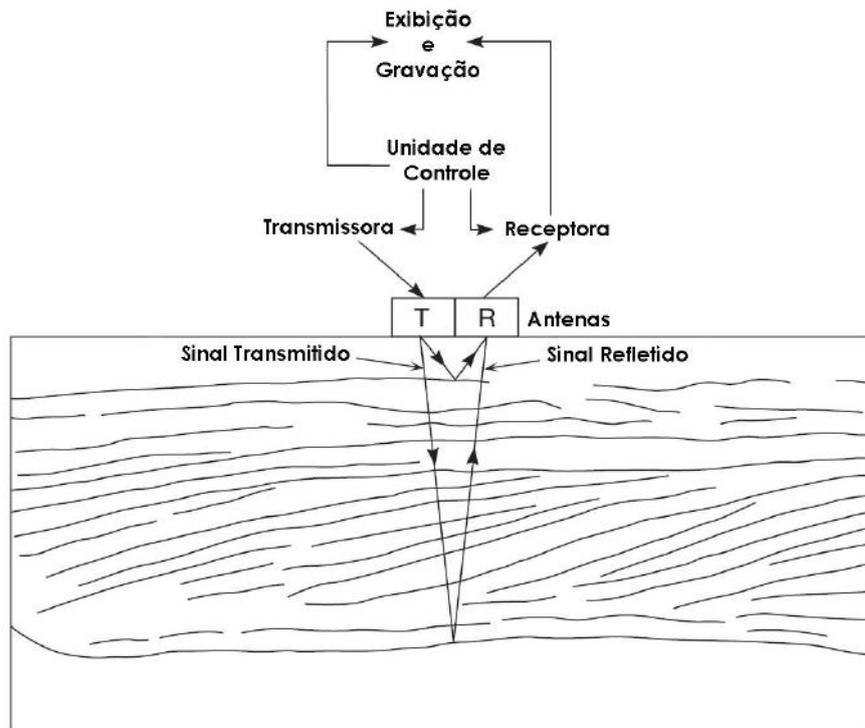


Figura 10 – Aquisição pelo método de GPR (Fonte: modificado de Neal, 2004).

## 6. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

### 6.1. Dados Gerais

Os dados citados a seguir foram retirados do relatório de auditoria técnica de segurança de 2016, executado na Barragem BR, de classificação restrita e numeração VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16, fornecido pela Mosaic.

A barragem BR (Figura 11) foi construída com o objetivo de conter os rejeitos e a magnetita gerados pela usina de concentração do Complexo de Mineração de Tapira. Sendo também utilizada para a captação de água, possibilitando a sua clarificação no reservatório, retorno à usina e extravasão.

Seu projeto de construção prevê uma capacidade no reservatório de 190.000.000 m<sup>3</sup> de água, porém o volume atual é de cerca de 98.000.000 m<sup>3</sup>, e por consequência o nível d'água no reservatório situa-se próximo a 7 metros abaixo da crista da barragem.



Figura 11 – Vista geral da Barragem BR e seu reservatório (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).

A construção da barragem BR foi realizada em duas etapas, uma representada pela edificação do maciço inicial e a segunda pelos alteamentos. Este projeto, iniciado em 1982, teve seu último alteamento realizado em 1998, alcançando a cota de 1200 metros. Um novo alteamento até a cota de 1210 metros está em fase conceitual, estando assim, em uma etapa que constitui a análise da viabilidade deste projeto. Atualmente a barragem conta com 570 metros de extensão e altura máxima de 61 metros.

Seu maciço é caracterizado por dique inicial constituído por solo coluvionar argiloso compactado e de cor vermelha, e por magnetita na sua zona jusante, utilizada no preenchimento da escavação (figura 12).

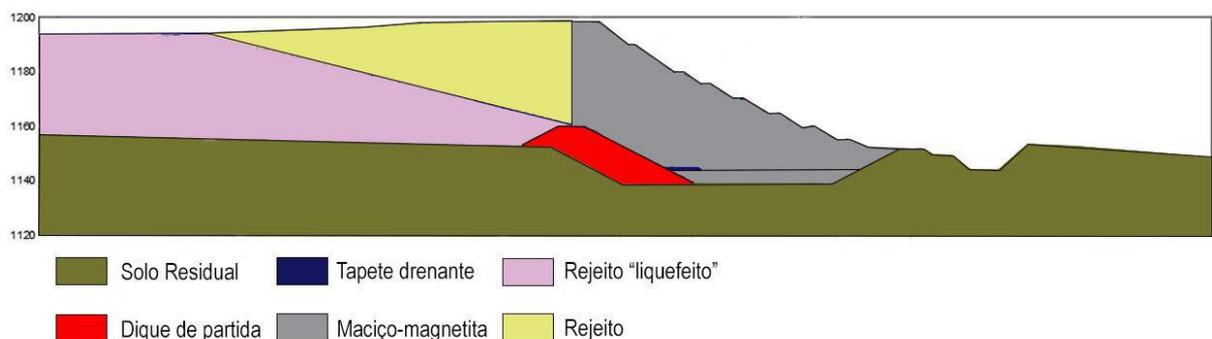


Figura 12 – Seção representativa do maciço da Barragem BR (Fonte: MOSAIC, 2017a).

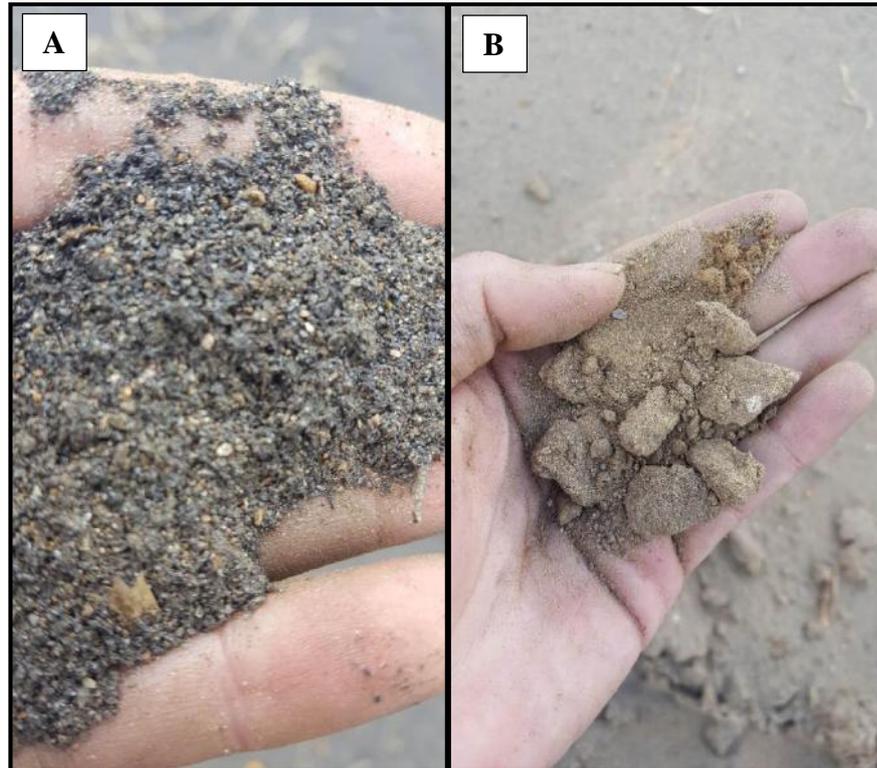


Figura 13 – A) material do corpo da barragem composto por areia de magnetita; B) Rejeito de flotação que constitui a praia da barragem (Fonte: MOSAIC, 2017b).

Os alteamentos da barragem foram executados pelo método de linha de centro. O alteamento até a cota de 1200 metros utilizou magnetita ciclizada (figura 13A) na zona de jusante, com espalhamento e compactação mecânicos e rejeito de flotação (figura 13B), lançado a partir da crista para a montante, formando uma praia com mais de 100 metros de extensão (figura 15).

Atualmente, a barragem conta com uma proteção superficial nos taludes superiores na porção a jusante, composta por uma vegetação rasteira. Mas no geral, a magnetita se encontra exposta na crista e no talude a jusante.

A barragem conta com sistemas de drenagem, compostos na parte interna da barragem por um tapete drenante posicionado em contato com o terreno natural e drenos de fundo (figura 14). O sistema superficial não possui dispositivos em concreto implantados, sendo dependente da declividade das bermas e da permeabilidade dos materiais que compõe o maciço.

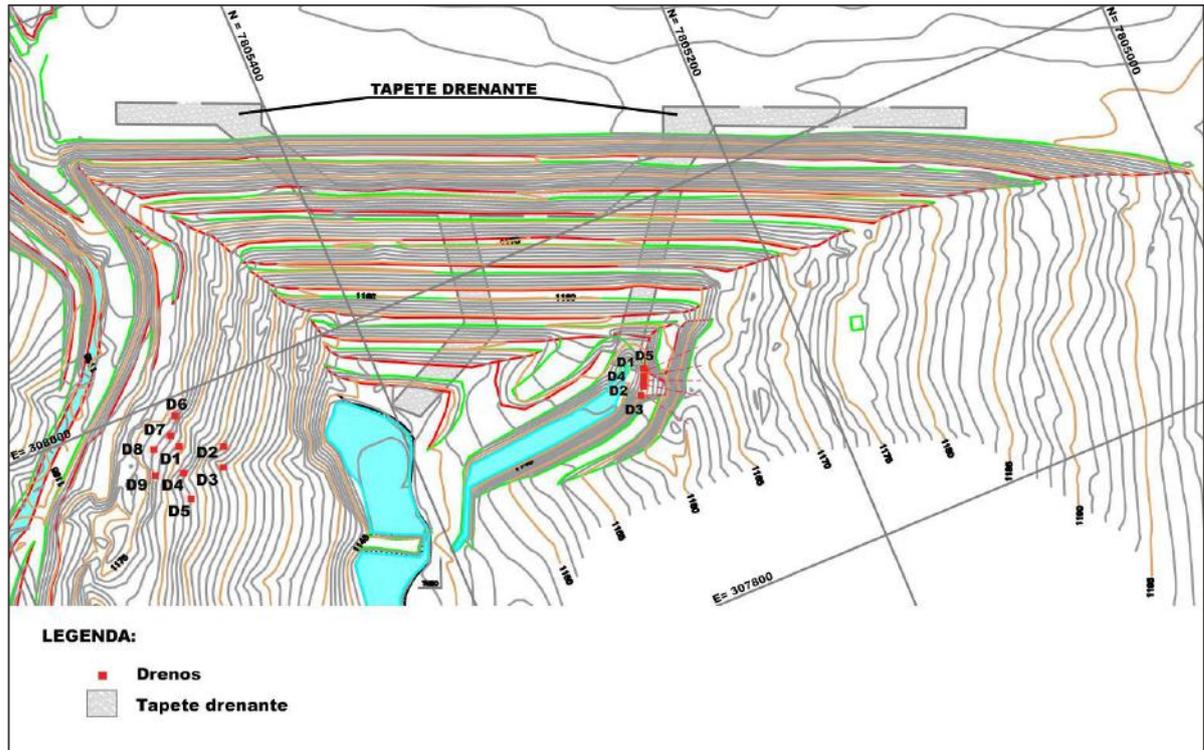


Figura 14 – Visão em planta do tapete drenante e dos 14 drenos de encosta instalados na Barragem BR.

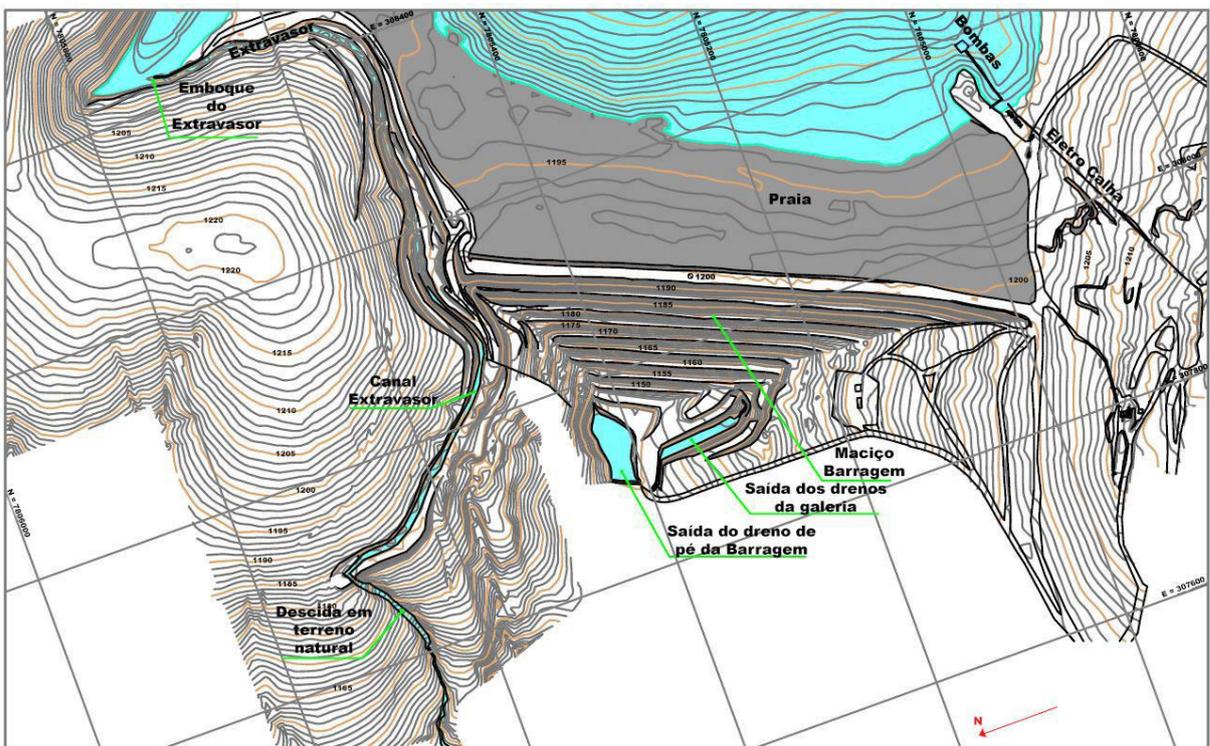


Figura 15 – Situação atual da Barragem BR, onde é possível observar na ombreira direita o canal extravasor.

O sistema extravasor é constituído por um canal escavado em terreno natural na ombreira direita (figura 15), com soleira na cota de 1192,8 metros.

O Monitoramento atualmente realizado compreende 1 piezômetro, 14 indicadores de nível d'água, 3 medidores de vazão de drenos, 14 drenos de encosta divididos entre as ombreiras esquerda e direita, 11 marcos superficiais, 1 régua no reservatório, 1 pluviômetro e 1 evaporímetro.

As principais características da barragem, listadas ao longo deste capítulo, estão resumidas a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo das características gerais da barragem BR fornecidas pela Mosaic (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).

<b>Características Gerais</b>	
Finalidade	Contenção de rejeitos e captação de água
Empresa projetista	- Dique inicial: Paulo Abib Engenharia (1982) - Alçamento cota 1180m: Paulo Abib Engenharia (1982) - Alçamento cota 1200m: Leme (1998)
Construção - Etapas	Maciço inicial/Alçamento
Data de construção	1982/1998
Elevação atual do coroamento	1200m
Altura atual da barragem	61m
Extensão atual do coroamento	570m
Volume do projeto	190.000.000m <sup>3</sup>
Volume atual do reservatório	98.000.000m <sup>3</sup>
Drenagem interna	Tapete drenante e dreno de fundo
Drenagem superficial	Não possui dispositivos implantados
Instrumentação	1 piezômetro, 14 indicadores de nível d'água, 3 medidores de vazão, 14 drenos de encosta, 11 marcos superficiais, 1 régua, 1 pluviômetro e 1 evaporímetro.

## 7. AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados realizada neste trabalho teve por objetivo principal desenvolver uma metodologia complementar ao sistema de monitoramento direto atualmente distribuído ao longo da barragem.

### 7.1. Caminhamento elétrico

Nesta aquisição os métodos de eletrorresistividade e polarização induzida foram executados pela técnica de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. Essa técnica de campo foi escolhida devido a possibilidade de realização de investigações horizontais, analisando assim variações laterais de um parâmetro físico, a uma ou várias profundidades pré-determinadas. Esse ensaio foi executado com sensores estaqueados com espaçamento constante de 3 metros (figura 16) entre si, espaçamento este que regula a profundidade alcançada na investigação.

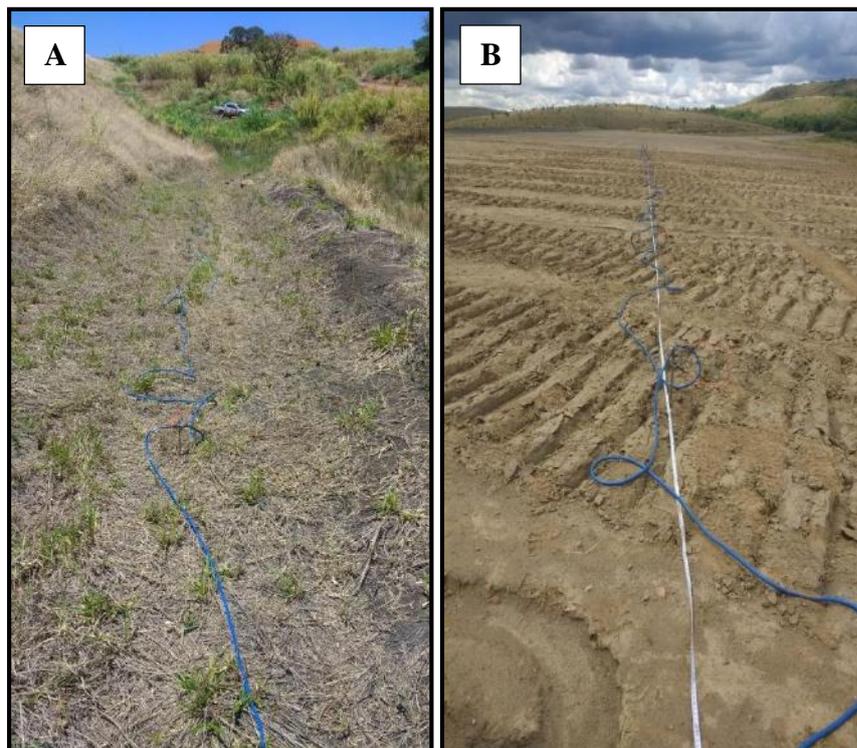


Figura 16 – A) Aquisição de caminhamento elétrico (Linha 05) com vista para sul em sentido a ombreira esquerda; B) Aquisição de caminhamento elétrico (Linha 01) na praia com vista para o norte em sentido a ombreira direita (Fonte: MOSAIC, 2017b).

No total foram adquiridas dez linhas, nove principais (L01 a L09) ao longo do maciço e das ombreiras, destacadas na cor vermelha na figura 17, e uma (L10) complementar nas ombreiras, representada pela cor verde. Estas linhas possuem comprimentos diferentes, listados na Tabela 4.

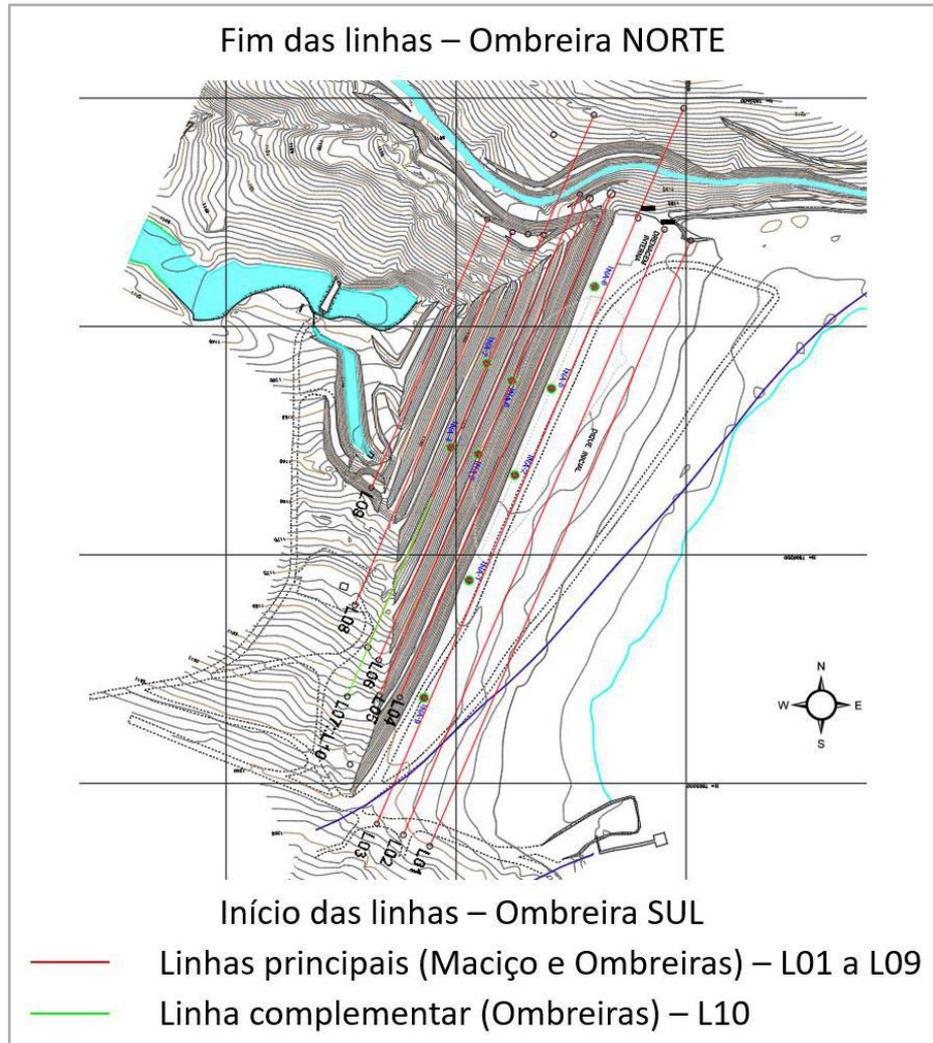


Figura 17 – Linhas executadas para o caminhamento elétrico.

Tabela 4- Comprimento das linhas de aquisição do caminhamento elétrico.

<b>Nome da linha</b>	<b>CE/IP Comprimento (m)</b>
L-01	585,00
L-02	583,00
L-03	691,00
L-04	479,00
L-05	475,00
L-06	447,00
L-07	516,00
L-08	365,00
L-09	265,00
L-10	188,00

O equipamento utilizado durante a aquisição de caminhamento elétrico (figura 18) foi o Resistivímetro *SuperSting* R8 com configuração de 64 canais e eletrodos com espaçamento de 3 metros.



Figura 18 - Equipamento utilizado na aquisição de CE– Resistivímetro (*SuperSting*) (Fonte: MOSAIC, 2017b).

## **7.2. Ground penetrating radar (GPR)**

Considerando a proposta de Guilbert (1999), que destaca que algumas condições devem ser avaliadas antes da realização de uma aquisição de GPR e durante a interpretação dos resultados, como por exemplo:

- A presença de solos com baixa condutividade produz baixas taxas de atenuação das ondas eletromagnéticas;
- Construções, cabos elétricos e outros materiais podem causar interferência se estiverem próximas da linha de levantamento;
- Areia e cascalho possuem, frequentemente, baixa condutividade e podem apresentar altos contrastes devido aos diferentes conteúdos de água resultando em maior penetração (baixa atenuação). Argilas, são constantemente, altamente condutivas devido as altas concentrações de íons dissolvidos, o que resulta em altas taxas de atenuação do sinal;
- O conteúdo de umidade, diminui a velocidade e aumenta a resolução. No entanto, as taxas de atenuação são maiores nos materiais úmidos que os materiais secos. Os íons dissolvidos na água dos poros aumentam a condutividade, resultando em um aumento adicional da taxa de atenuação;

- A força de potencial refletor de interesse precisa ser considerada dependendo do objetivo do trabalho, pois cada tipo de antena alcança uma profundidade;

Levando em consideração todas as variáveis citadas, a aquisição de *ground penetrating radar* (figura 19) foi executada sobre as mesmas linhas que o caminhamento elétrico, porém sem se estender até as ombreiras (figura 20), devido à dificuldade encontrada para caminhar com o equipamento nesta região. As 10 linhas de aquisição, apresentaram comprimentos diferentes entre si, e estes estão listados na tabela 5.

Desse modo, o equipamento utilizado nesta aquisição foi SIR3000 do fabricante GSSI, com a antena de 100MHz, escolhida devido ao melhor resultado apresentado em testes realizados anteriormente a aquisição.



Figura 19 - Aquisição de GPR realizada na região da crista do barramento (Fonte: MOSAIC, 2017b).

Tabela 5 – Comprimento das linhas de aquisição do método GPR.

Nome da linha	GPR Comprimento (m)
L-01	585,00
L-02	583,00
L-03	578,00
L-04	479,00
L-05	475,00
L-06	409,00
L-07	394,00
L-08	365,00
L-09	265,00

L-10	188,00
------	--------

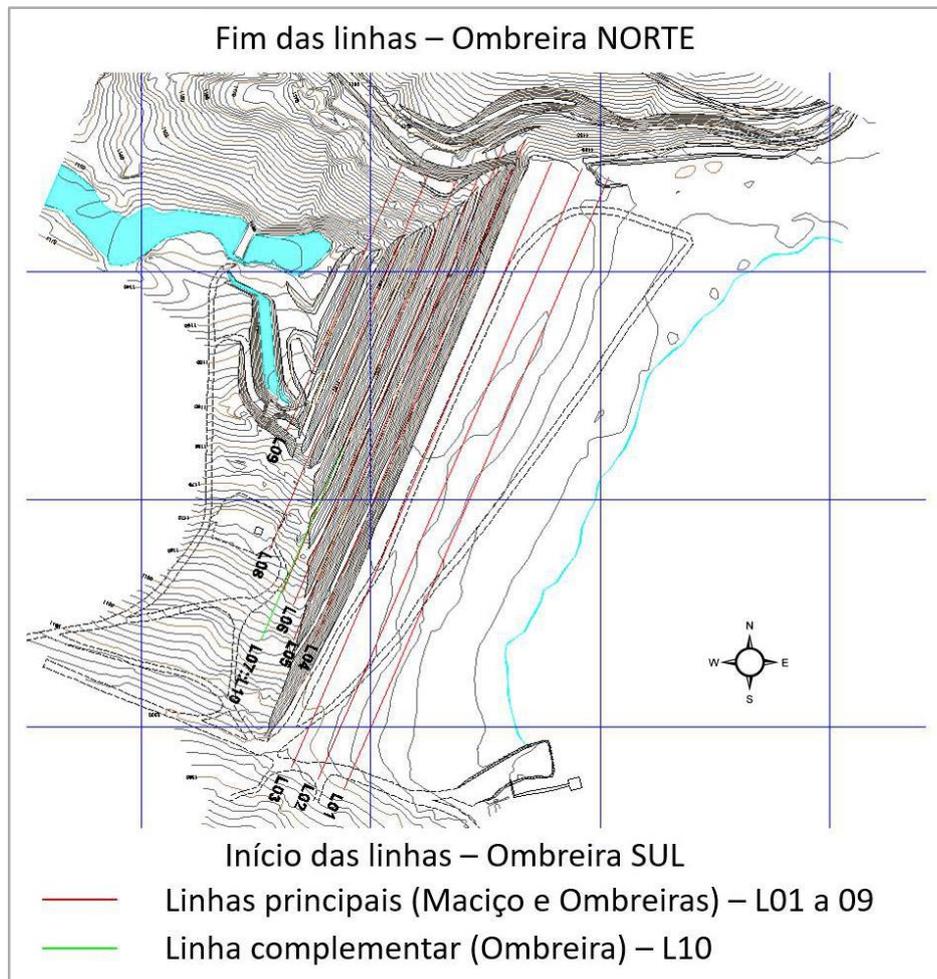


Figura 20 – Linhas executadas para o *ground penetrating radar*.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à grande quantidade de dados coletados, neste trabalho, apenas algumas seções serão utilizadas, a fim de demonstrar a efetividade dos métodos geofísicos em fornecer uma metodologia complementar de monitoramento. As demais seções serão utilizadas em trabalhos futuros.

### 8.1. Seções-tipo

Os dados obtidos nas aquisições geofísicas foram comparados com os de seções-tipos, estas são seções transversais ao corpo da barragem, adquiridas através do monitoramento de instrumentos de medição direta denominados INA's (indicadores de nível d'água). Essa comparação, entre os dados geofísicos e os obtidos pelos

INA's, teve como produto a demarcação do topo da superfície freática nas áreas das seções analisadas.

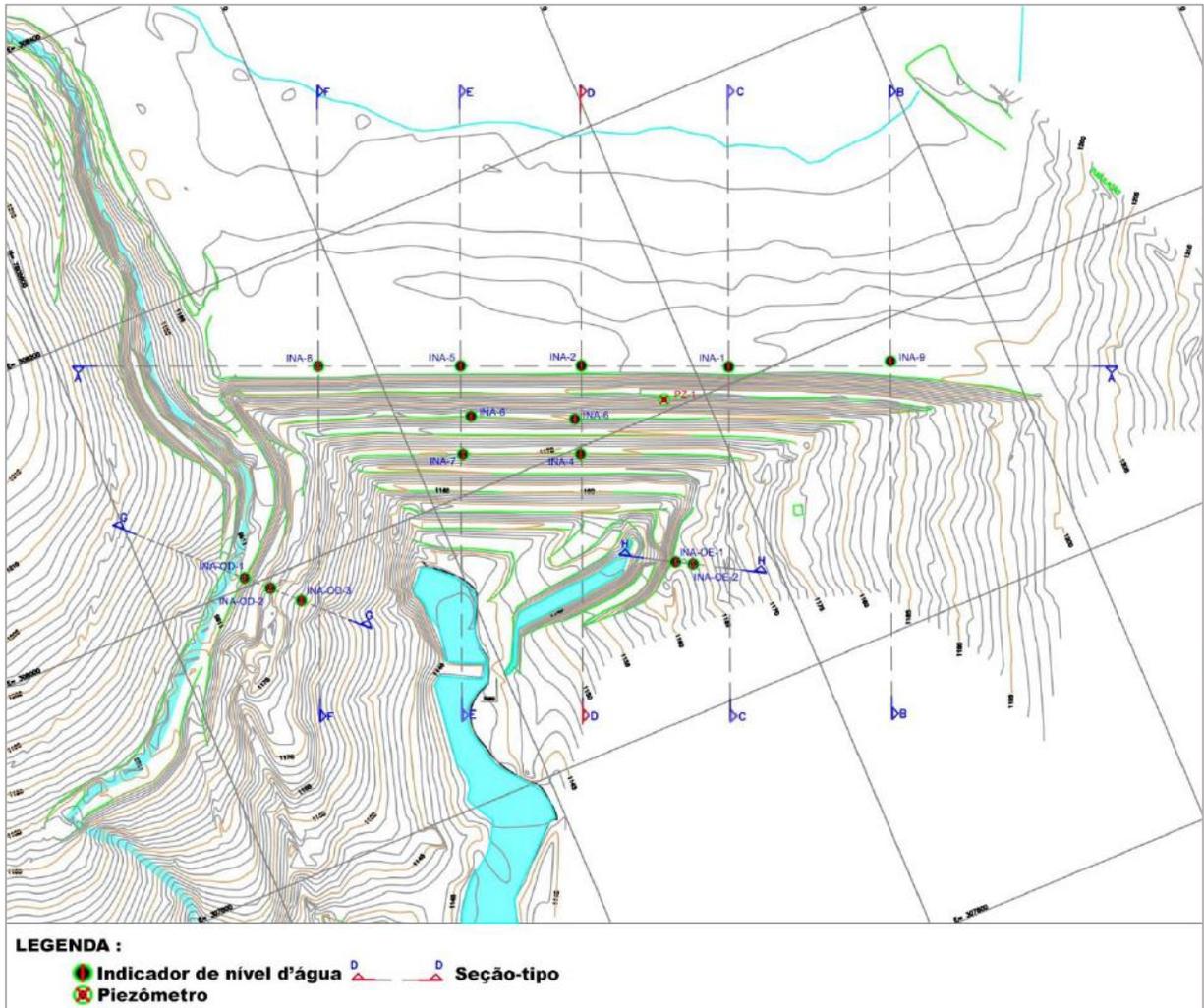


Figura 21 – Localização dos instrumentos de monitoramento direto e das seções-tipo.

Os INA's estão disponibilizados ao longo do maciço e das ombreiras da barragem, como indicado na figura 21. No total, o monitoramento é executado por 14 INA's e 1 piezômetro, e suas respectivas coordenadas estão listadas na tabela 6, assim como suas cotas e a profundidade de cada furo.

As seções-tipo, também indicadas na figura 21, são identificadas por letras (por exemplo: A-A') e contabilizam 8 seções ao todo. A fim de comparar os dados obtidos nessas seções com as geradas pelos métodos geofísicos, a seção D-D' foi utilizada. Esta seção foi selecionada devido a uma maior quantidade de instrumentos alinhados a ela, sendo assim capaz de gerar dados suficientes para um estudo do comportamento da água subterrânea no maciço.

Tabela 6 – Coordenadas e cotas dos indicadores de nível d'água de monitoramento direto.

Instrumento	N	E	Cota de topo (m)	Profundidade de furo (m)
INA-1	7805177,755	308011,379	1200,680	35,93
INA-2	7805269,943	308051,092	1199,940	40,00
INA-3	7805288,220	308019,059	1180,280	32,43
INA-4	7805293,979	307995,503	1170,020	26,92
INA-5	7805345,732	308082,883	1199,400	41,48
INA-6	7805352,500	308048,448	1181,680	36,22
INA-7	7805367,834	308026,489	1170,680	27,37
INA-8	7805434,944	308120,412	1199,412	37,26
INA-9	7805074,869	307972,062	1199,410	20,16
INA-OD-1	7805537,541	308006,106	1187,050	17,60
INA-OD-2	7805524,128	307992,843	1178,020	10,96
INA-OD-3	7805508,100	307976,808	1172,000	13,67
INA-OE-1	7805263,207	307902,199	1164,081	-
INA-OE-2	7005252,763	307896,171	1164,606	-
PZ-1	7805227,063	308007,847	1187,780	43,20

Como é possível observar na figura 22, a linha da freática na seção-tipo D-D', que corta transversalmente o centro da barragem, foi inferida a partir dos dados de três INA's (INA2, INA3 e INA4).

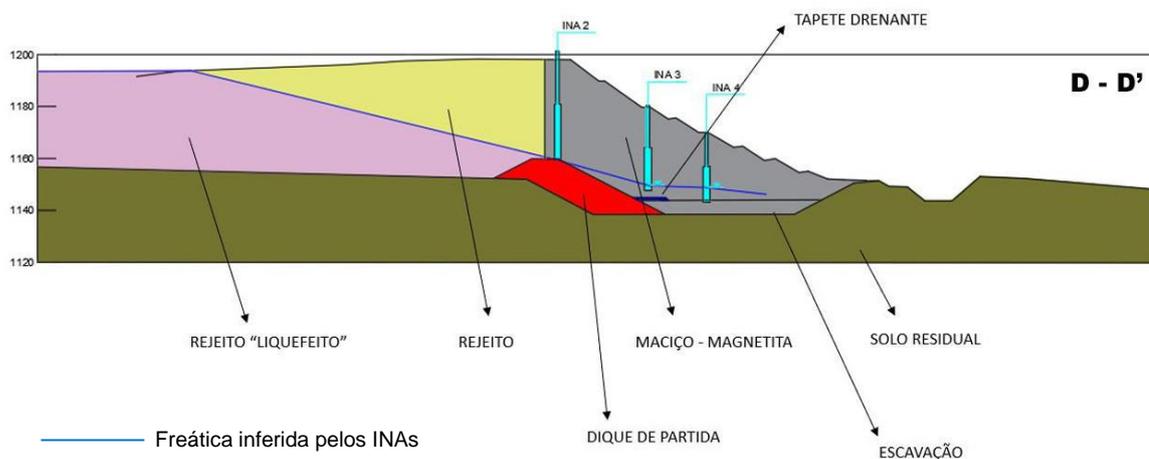


Figura 22 – Superfície freática inferida com o auxílio dos indicadores de nível d'água.

## 8.2. Caminhamento elétrico - Análise de dados

Com o auxílio das seções geofísicas obtidas, os topos das anomalias condutivas foram demarcados, indicando aproximadamente a posição da superfície freática no barramento.

As análises das seções de eletrorresistividade consideraram a diferenciação das magnitudes das resistividades aparentes apresentadas. Com zonas de alta resistividade aparente (ZAR), apresentando valores acima de 1.116 ohm.m e zonas de baixa resistividade aparente (ZBR), com valores abaixo de 185 ohm.m. As zonas com magnitudes intermediárias, foram identificadas como as zonas de resistividade intermediária (ZIR). A figura 23 apresenta a escala de resistividade utilizada neste trabalho.

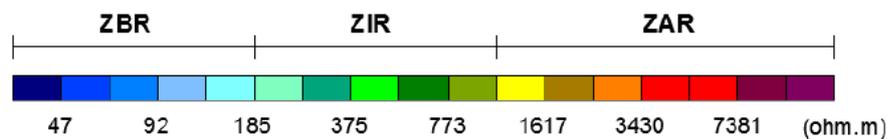


Figura 23 - ZBR: Zonas de Baixa Resistividade aparente; ZIR: Zonas de Resistividade aparente Intermediárias; ZAR: Zonas de Alta Resistividade aparente (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).

Em geral, nestas seções de eletrorresistividade, nas zonas de baixa resistividade aparente, os intervalos com valores entre 23,5 e 185 ohm.m foram correlacionados com regiões do maciço possivelmente saturadas, ou até mesmo, com um certo teor de água.

As diferenciações nas seções de polarização induzida foram realizadas com base na identificação de zonas com alta cargabilidade aparente (ZAC), cujos valores estão acima de 58 msec, e zonas de baixa cargabilidade aparente, com valores abaixo de 24 msec. As zonas com valores intermediários aos anteriormente descritos, foram retratadas como zonas de cargabilidade intermediária (ZIC). A escala utilizada para a polarização induzida está em destaque na figura 24.

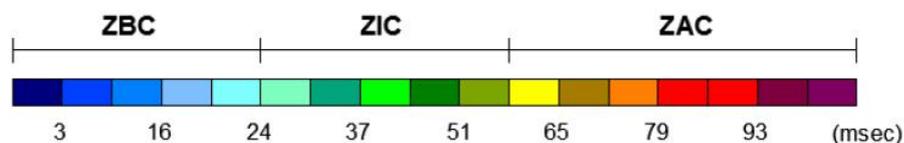


Figura 24 - ZBC: Zonas de baixa cargabilidade aparente; ZIC: Zonas de cargabilidade aparente intermediárias; ZAC: Zonas de alta cargabilidade aparente (Fonte: Relatório VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16).

A seguir, as seções de caminhamento elétrico serão analisadas em conjunto, de acordo com a linha de aquisição, sendo uma seção de eletrorresistividade e outra de polarização induzida. Todas as seções obtiveram respostas semelhantes, sendo assim, as mais representativas serão abordadas ao longo deste trabalho, estas são as linhas número 01, 04 e 07.

O início de todas as seções encontra-se na ombreira esquerda do barramento, enquanto o fim das mesmas se encontra na ombreira direita.

### 8.2.1 Seção Linha 01

A linha de aquisição número 01 está situada sobre a praia de rejeitos de flotação, como indicado na figura 25, próxima ao seu limite com o reservatório da barragem.

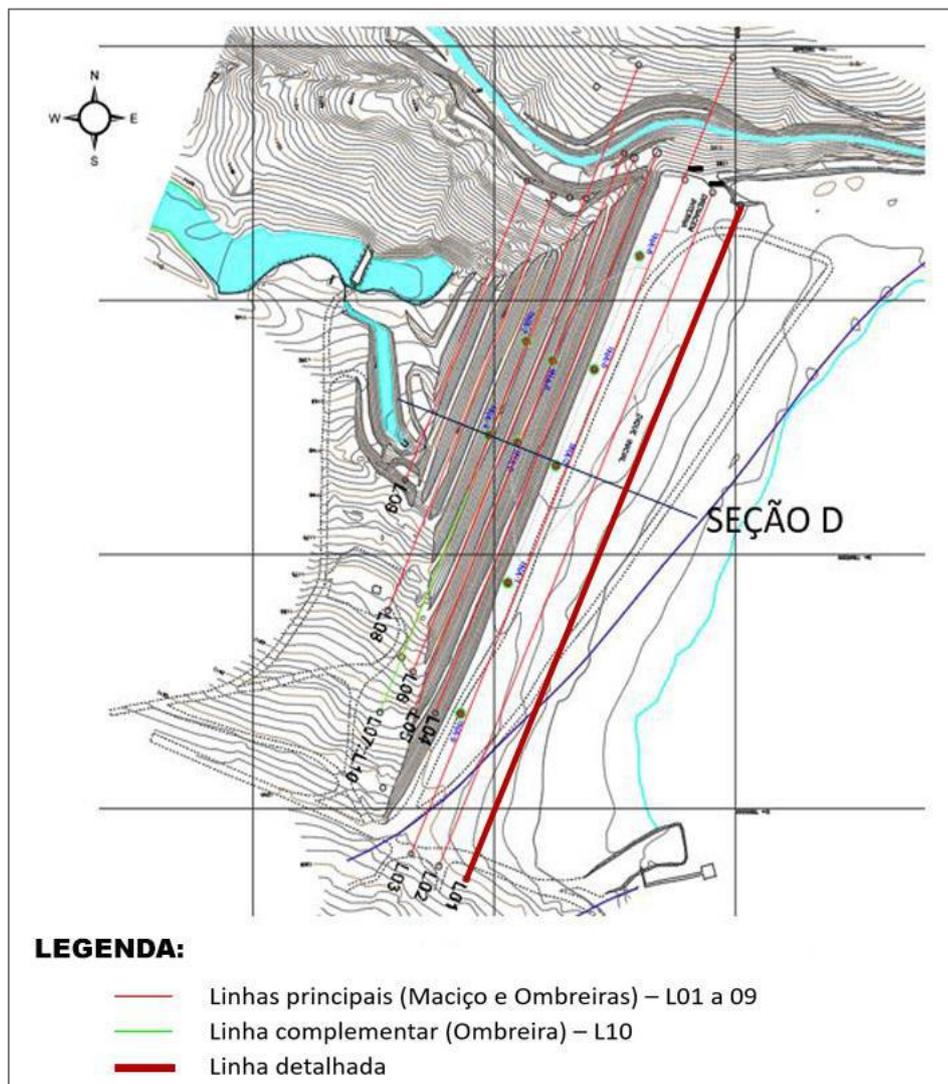


Figura 25 – Localização da linha de aquisição 01 de CE.

Na figura 26, que representa a linha 01 de eletrorresistividade, é possível identificar uma anomalia de baixa resistividade, que varia de 23,5 a 185 ohm.m e é correlacionada a um maior teor de água. Esta anomalia está presente ao longo da parte basal da seção, e da base para interpretação de que o fluido que percola nesta região da barragem parte do reservatório para a mesma. O topo desta anomalia de baixa resistividade (ZBR) varia entre as cotas de 1187 metros e 1170 metros, e será utilizado posteriormente na correlação com os dados obtidos pelos instrumentos de monitoramento direto.

Além desta região, é possível observar duas pequenas zonas anômalas de baixa resistividade aparente (ZBR) próximas ao topo da seção. A primeira, situada na extrema esquerda da praia, localizada no intervalo de 0 metros a 48 metros, se estendendo em profundidade até a cota de 1180 metros. A segunda, localizada no intervalo entre 144 metros e 585 metros, com extensão vertical, em profundidade, de aproximadamente 5 metros. O maior teor de água presente nestas duas áreas, possivelmente ocorre devido aos drenos laterais que seguem a direção do vertedouro, que se encontra ao longo da base da barragem, sendo assim, provém de um fluxo vertical de fluidos. Logo, este maior teor de água, em questão, não significa necessariamente uma percolação que parte do reservatório para o corpo da barragem.

A seção ainda possui próxima ao seu topo zonas de resistividade intermediária (ZIR) com porções descontínuas de alta resistividade (ZAR), que indicam regiões mais secas da praia.

A linha 01, adquirida pelo método de polarização induzida, indicada na figura 27, possui uma anomalia de média e alta cargabilidade aparente, variando de aproximadamente 24 msec a 79 msec, que se estende ao longo de grande parte da seção, e que coincide, em algumas regiões, com a anomalia de baixa resistividade apresentada na seção da linha 01 de eletrorresistividade.

Também é possível identificar na porção superior da seção 01 de IP, uma faixa contínua de baixa cargabilidade (ZBC) e uma região concentrada de baixa cargabilidade abaixo da ombreira esquerda.

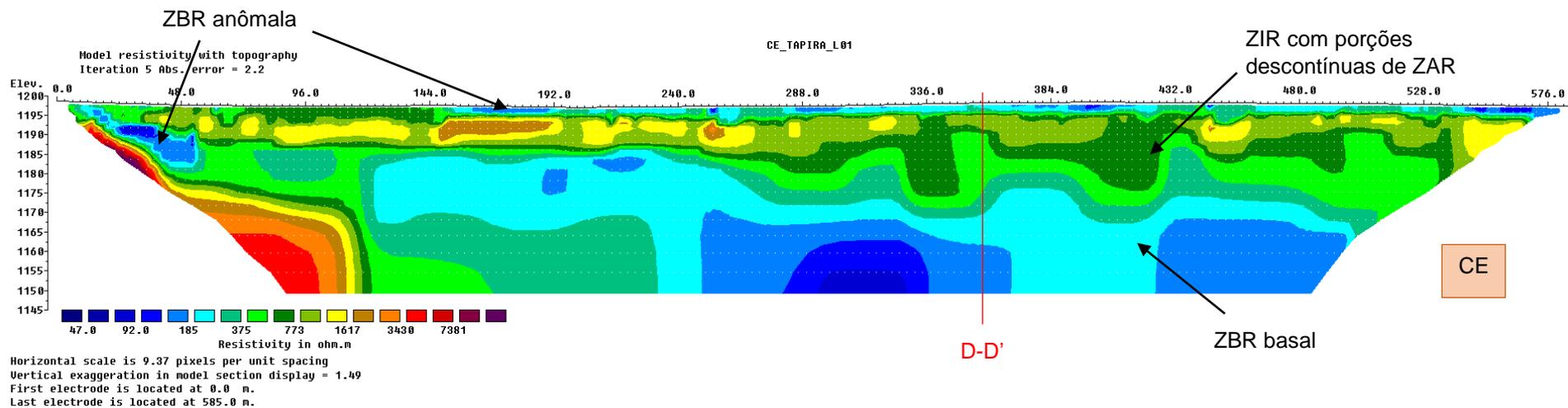


Figura 26 – Seção Linha 01 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.

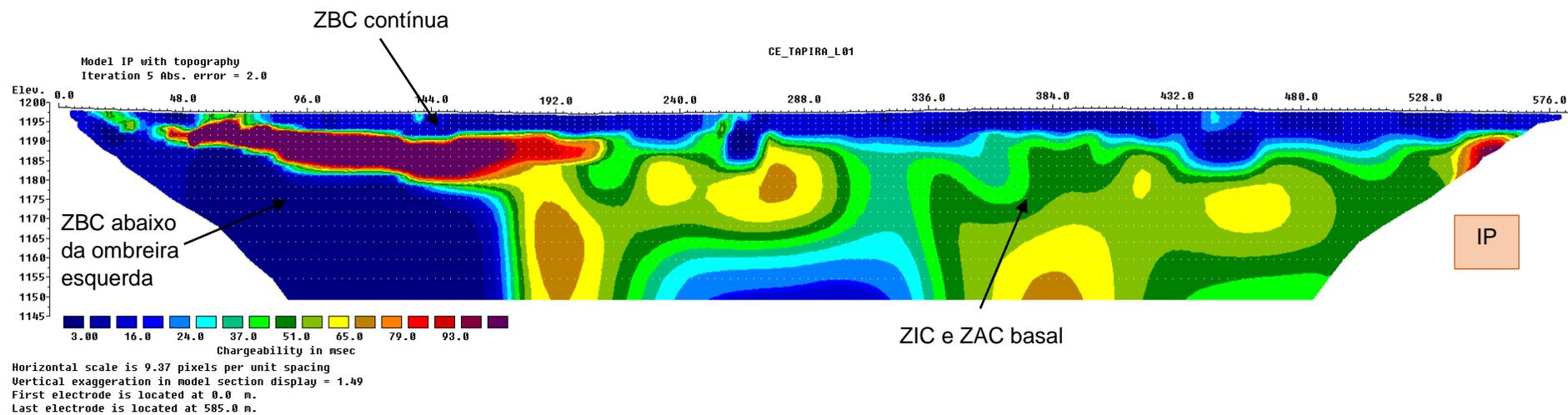


Figura 27 – Seção Linha 01 de polarização induzida.

Estas zonas de baixa resistividade (ZBR) e baixa cargabilidade (ZBC) destacadas anteriormente, além de estarem relacionadas a regiões com maior teor de água, podem ainda ser correlacionadas a zonas mais argilosas do barramento.

Correlacionando os dados obtidos pelo monitoramento direto e os dados das aquisições geofísicas, foi possível traçar o topo das anomalias condutivas das seções de eletrorresistividade na seção-tipo, tendo assim a posição aproximada da superfície freática na praia, indicada na figura 28.

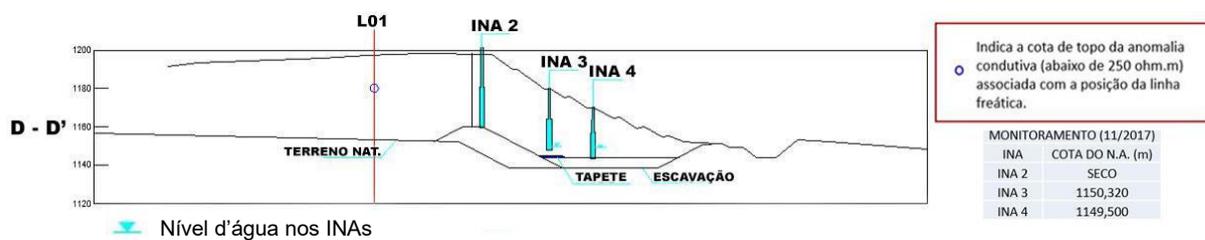


Figura 28 – Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 01, na seção-tipo.

### 8.2.2 Seção Linha 04

A linha 04, indicada na figura 29, está situada no maciço da barragem, ao longo da cota de 800 metros, 30 metros abaixo da linha 01.

A seção de eletrorresistividade (figura 30) apresenta, em geral, zonas de resistividades aparentes intermediárias (ZIR), presentes ao longo de toda a seção, atingindo em profundidade a cota de 1160 metros. Abaixo desta cota a resistividade torna-se inferior a 185 ohm.m, e esta zona de baixa resistividade aparente (ZBR) é correlacionada da mesma forma que a seção da linha 01, a presença de fluido no maciço.

É possível observar ao longo da seção 04, pontos isolados de baixa resistividade (ZBR) em meio a uma faixa predominante de resistividade intermediária (ZIR). A anomalia de baixa resistividade presente entre 288 e 336 metros, foi interpretada como um ruído, apesar de sua extensão considerável. Por outro lado, a anomalia próxima à ombreira direita foi correlacionada à presença de drenos.

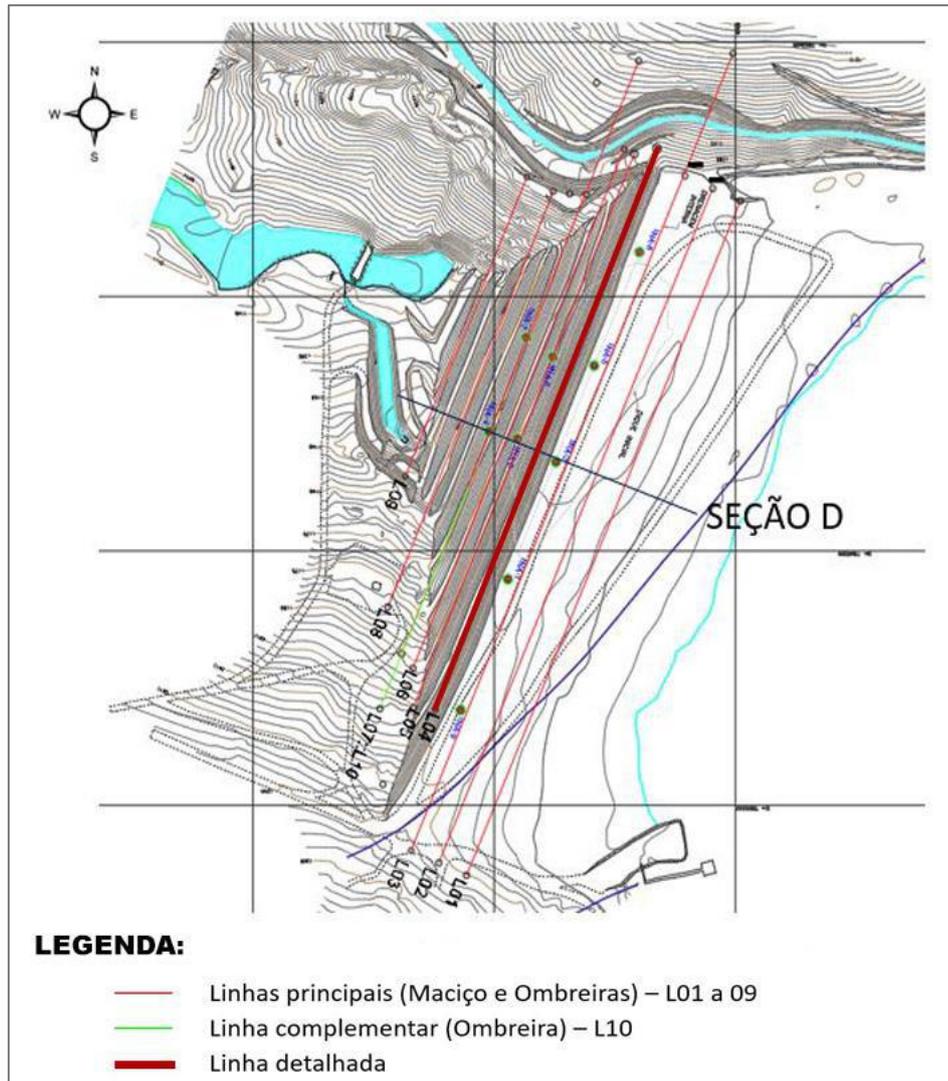


Figura 29 – Localização da linha de aquisição 04 de CE.

Os resultados de polarização induzida adquiridos na linha 04, apresentados na figura 31, são caracterizados pela predominância de zonas de alta cargabilidade (ZAC) e de cargabilidade intermediária (ZIC) na porção mais superficial do barramento. Essas zonas vão gradando em profundidade para zonas de baixa cargabilidade (ZBC), que não ocorrem lateralmente de maneira contínua, sendo intercaladas por zonas de cargabilidade intermediária.

Essa relação entre cargabilidades aparentes altas e intermediárias pode estar associada a materiais com faixas granulométricas distintas, onde os materiais mais finos apresentam uma resposta intermediária (ZIC).

A partir desses dados, o topo da anomalia condutiva da seção de eletrorresistividade, com cota próxima a 1160 metros, foi novamente traçado na seção-tipo (figura 32), tendo assim a localização aproximada da superfície freática no

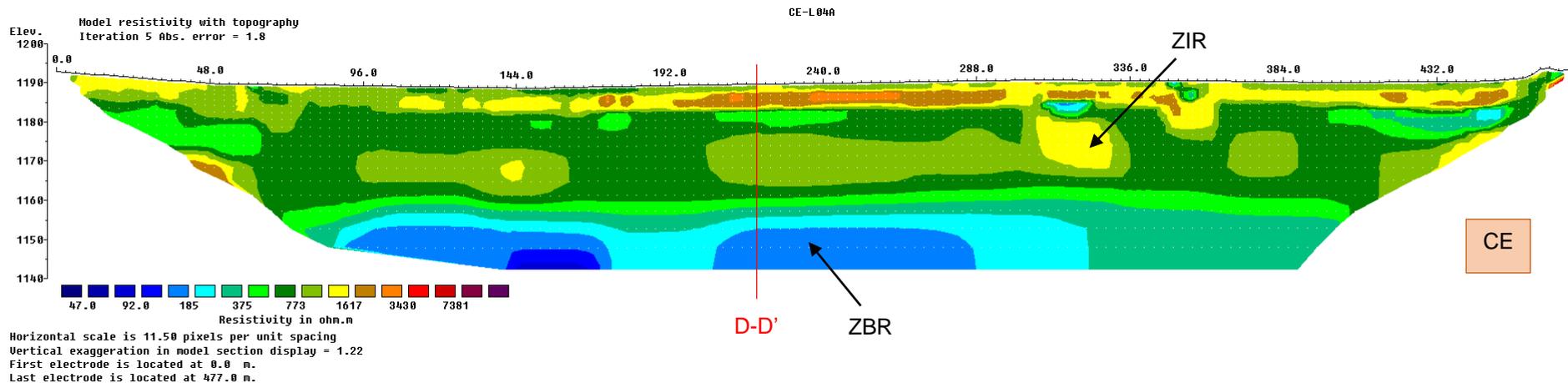


Figura 30 – Seção Linha 04 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.

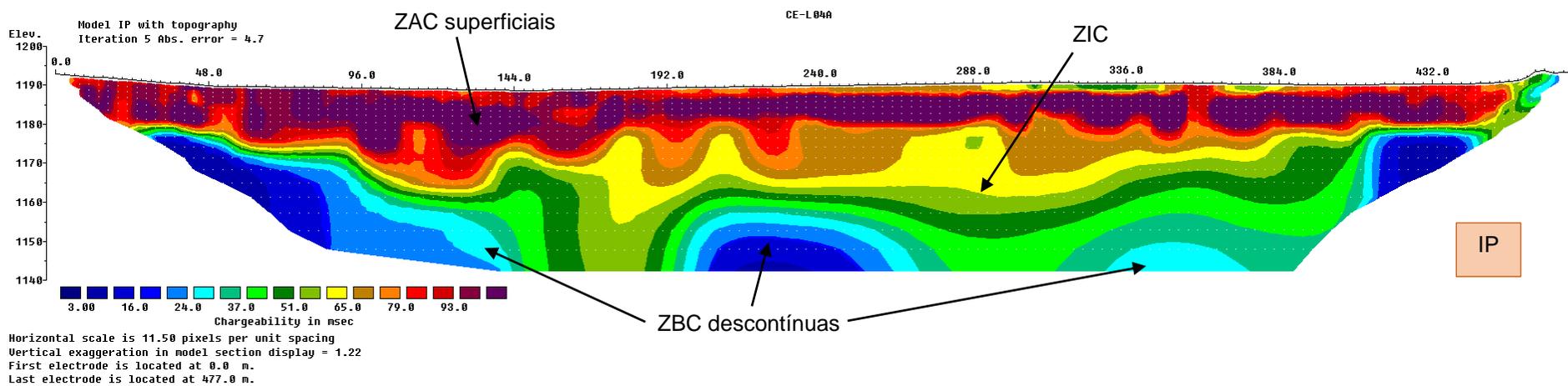


Figura 31 – Seção Linha 04 de polarização induzida.

maciço, local onde foi realizado o levantamento da linha 04. A freática foi inferida cerca de 20 metros abaixo da inferida na linha 01.

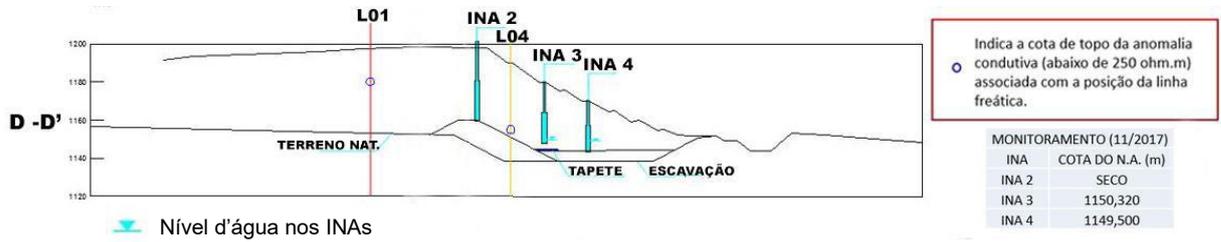


Figura 32 - Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 04, na seção-tipo.

### 8.2.3 Seção Linha 07

A linha de aquisição 07 está localizada no meio do maciço, próxima a quarta berma, como é possível observar na figura 33, e se estende até a ombreira direita, onde está localizado o canal do extravasador.

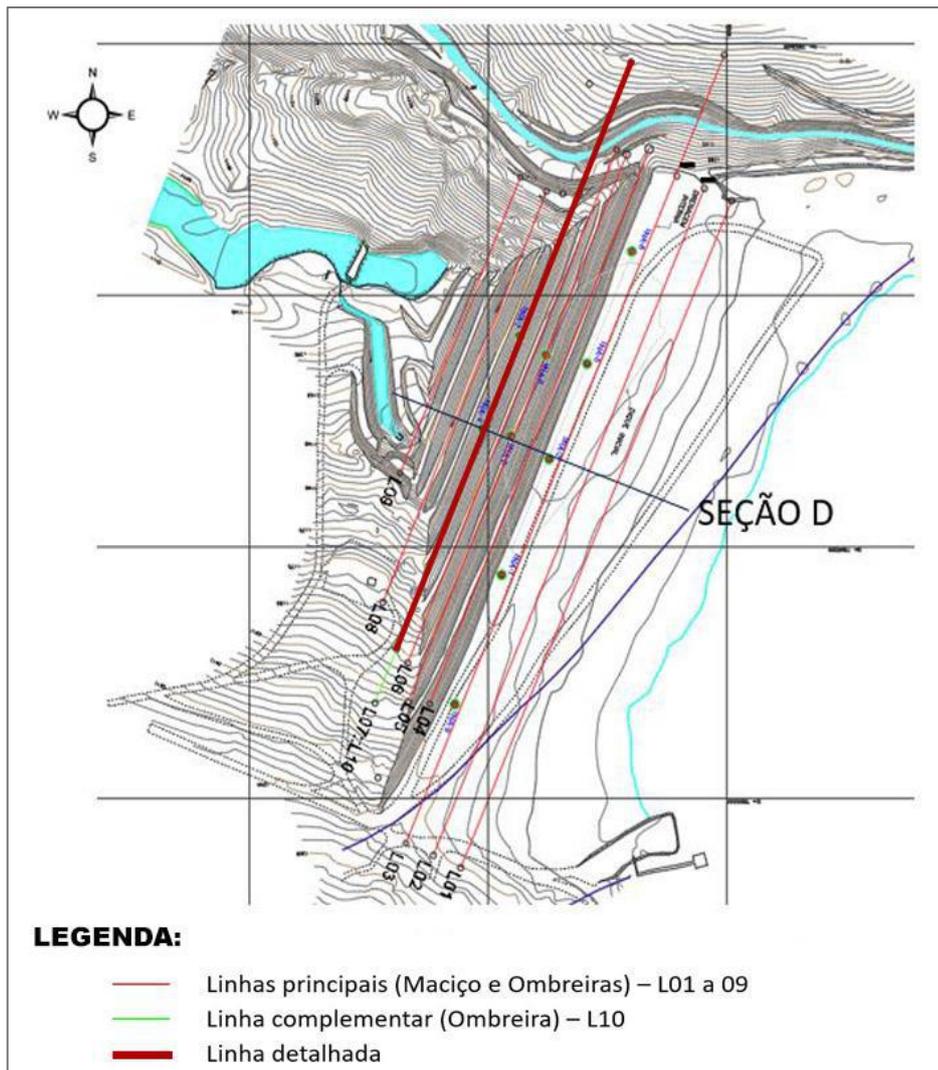


Figura 33 – Localização da linha de aquisição 07 de CE.

Nesta linha de aquisição o método de eletrorresistividade se mostrou novamente efetivo na localização de zonas possivelmente saturadas ou com maior teor de água. Essa zona, é caracterizada por uma resistividade aparente baixa (ZBR), ou seja, por uma alta condutividade, e está situada na base da seção da linha 07 (figura 34). O topo desta zona, que representa o topo da superfície freática atinge a cota de aproximadamente 1160 metros.

Devido a aquisição realizada até a ombreira direita, é possível observar que o extravasor está sobre uma região marcada por zonas de alta resistividade aparente (ZAR) e resistividade aparente intermediária (ZIR), que se comportam de maneira contínua ao longo da seção. Estas indicam, na região da ombreira direita, que não há vazamentos do extravasor para a ombreira. Subjacente a esta região, próximo a cota de 1180 metros, observa-se a presença de uma pequena área com baixa resistividade aparente (ZBR) com aproximadamente 105 ohm.m, essa zona ocorre de forma descontínua em meio as zonas de intermediária e alta resistividade aparente, e pode indicar uma região com maior concentração de água. A não conexão entre esta área de baixa resistividade e as demais presentes ao longo da seção, apontam que não há fluxo de água partindo do extravasor para o restante do maciço.

Na seção obtida pelo método de polarização induzida (figura 35), o topo do barramento é caracterizado por zonas de cargabilidade aparente altas a intermediárias. Em profundidade estas zonas gradam para valores de cargabilidade baixos (ZBC), que ocorrem descontinuamente em meio a zonas de cargabilidade aparente intermediárias (ZIC).

Prosseguindo a comparação entre os dados geofísicos e os de monitoramento direto, novamente o topo da anomalia de baixa resistividade da seção de eletrorresistividade foi inferido na seção-tipo, representando assim, o topo da superfície freática nesta seção. Como nas comparações anteriores, as respostas geofísicas coincidem com as dos instrumentos de investigação direta (INAs), como indicado na figura 36.

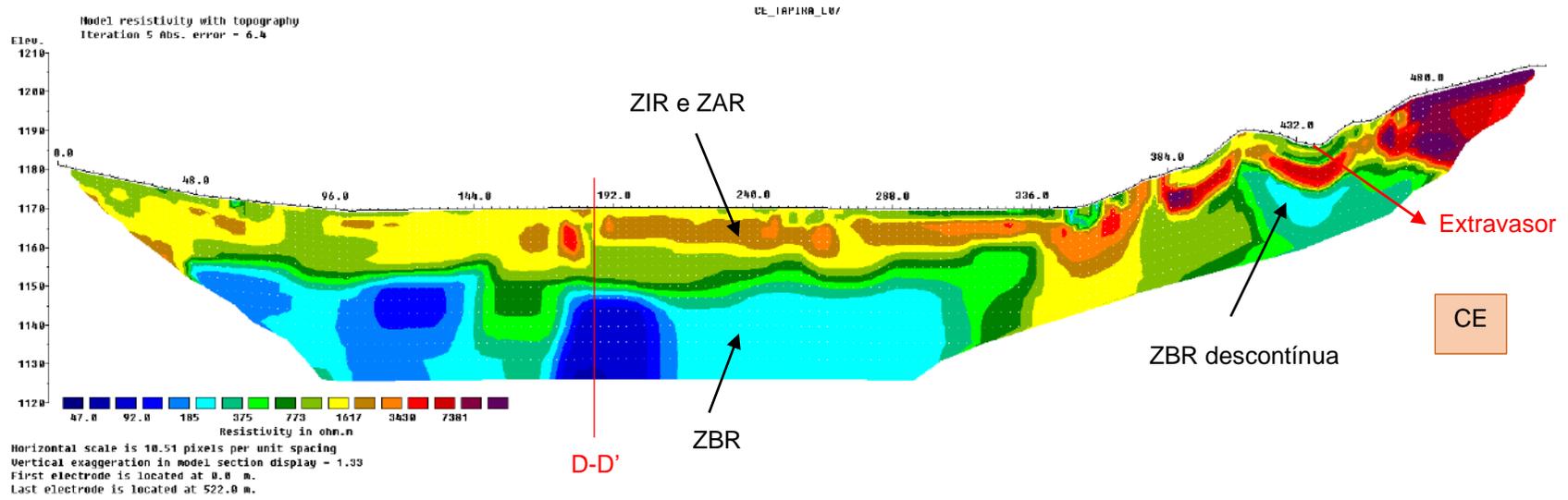


Figura 34 – Seção Linha 07 de eletrorresistividade. A linha vermelha (D-D') indica a posição da seção-tipo em relação a seção de eletrorresistividade.

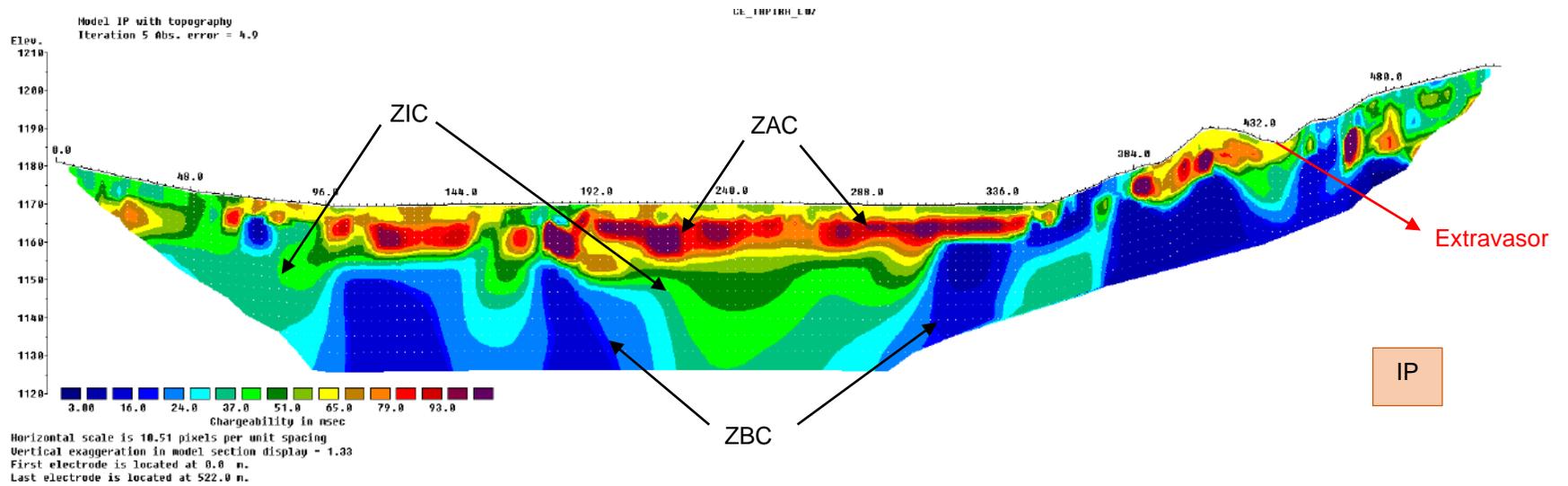


Figura 35 – Seção Linha 07 de polarização induzida.

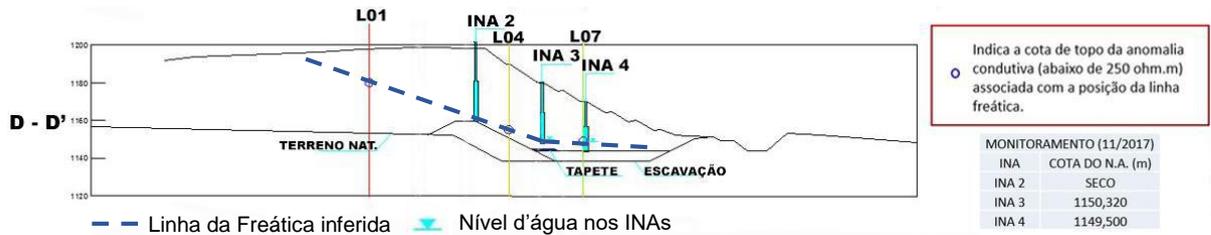


Figura 36 – Localização do topo da superfície freática, estimada pelos métodos geofísicos na aquisição da linha 07, na seção-tipo.

### 8.3 Ground Penetrating Radar (GPR) – análise de dados

A aquisição de GPR foi executada em 10 linhas na mesma direção das seções do caminhamento elétrico. Porém, a aquisição não se estendeu para a região das ombreiras, devido à dificuldade de se locomover com o instrumento de aquisição nestas regiões.

Da mesma forma que os demais métodos aplicados, apenas as seções 01, 04 e 07 serão utilizadas neste trabalho, as demais seções serão analisadas em trabalhos futuros.

#### 8.3.1 Seção linha 01

A primeira seção analisada está situada sobre a praia de rejeitos de flotação, como mostra a figura 37, próxima ao reservatório da barragem.

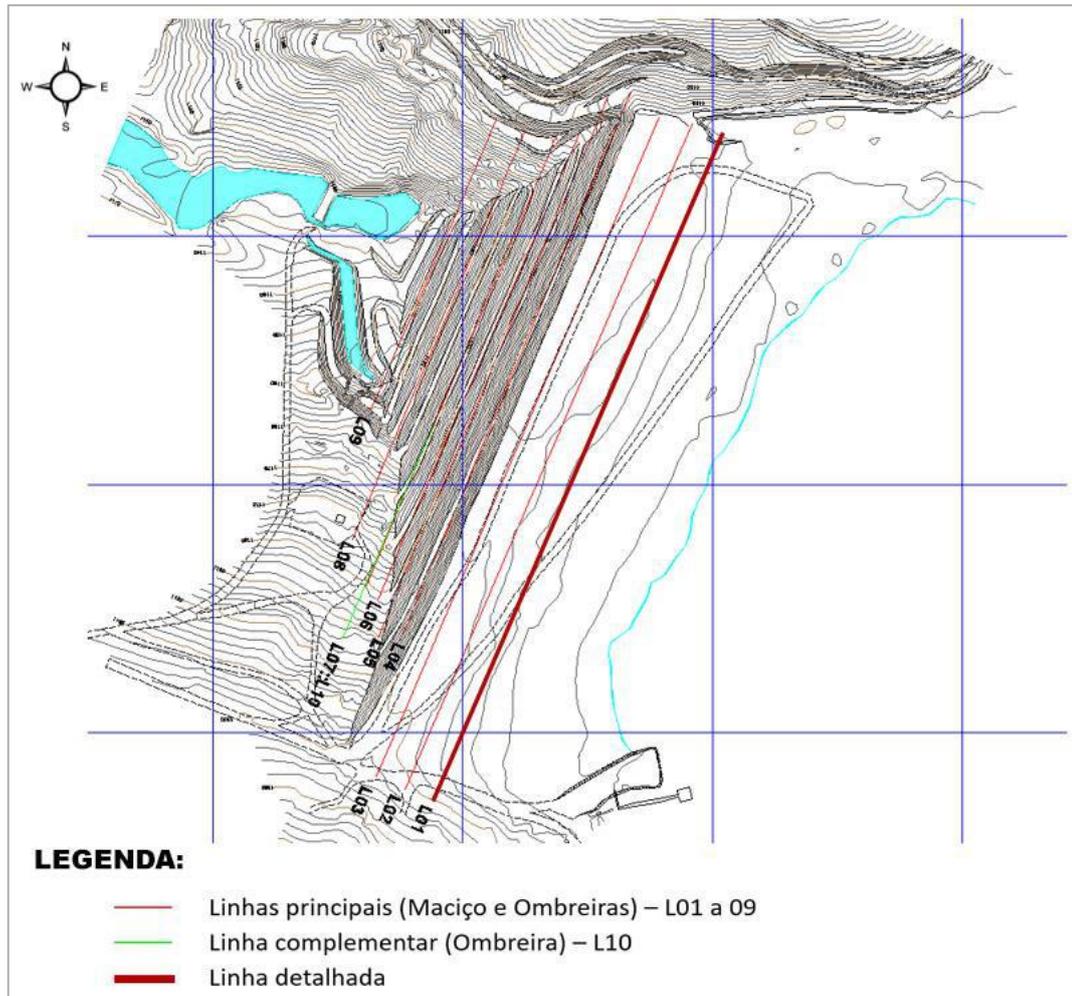


Figura 37 – Mapa de localização da linha de aquisição 01 de GPR.

Ao analisar esta seção, é possível identificar uma mudança nos padrões de refletores, indicando uma possível heterogeneidade na disposição dos materiais, neste caso do rejeito de flotação em relação as ombreiras.

Esse truncamento de refletores com diferentes características fica mais evidente na porção a esquerda da seção, de 32 a 132 metros, como destacado na figura 38.

Aparentemente essa diferença de padrão de refletores é mais marcante em deposições mais recentes dos rejeitos, pois em maiores profundidades na seção esses padrões não são identificados.

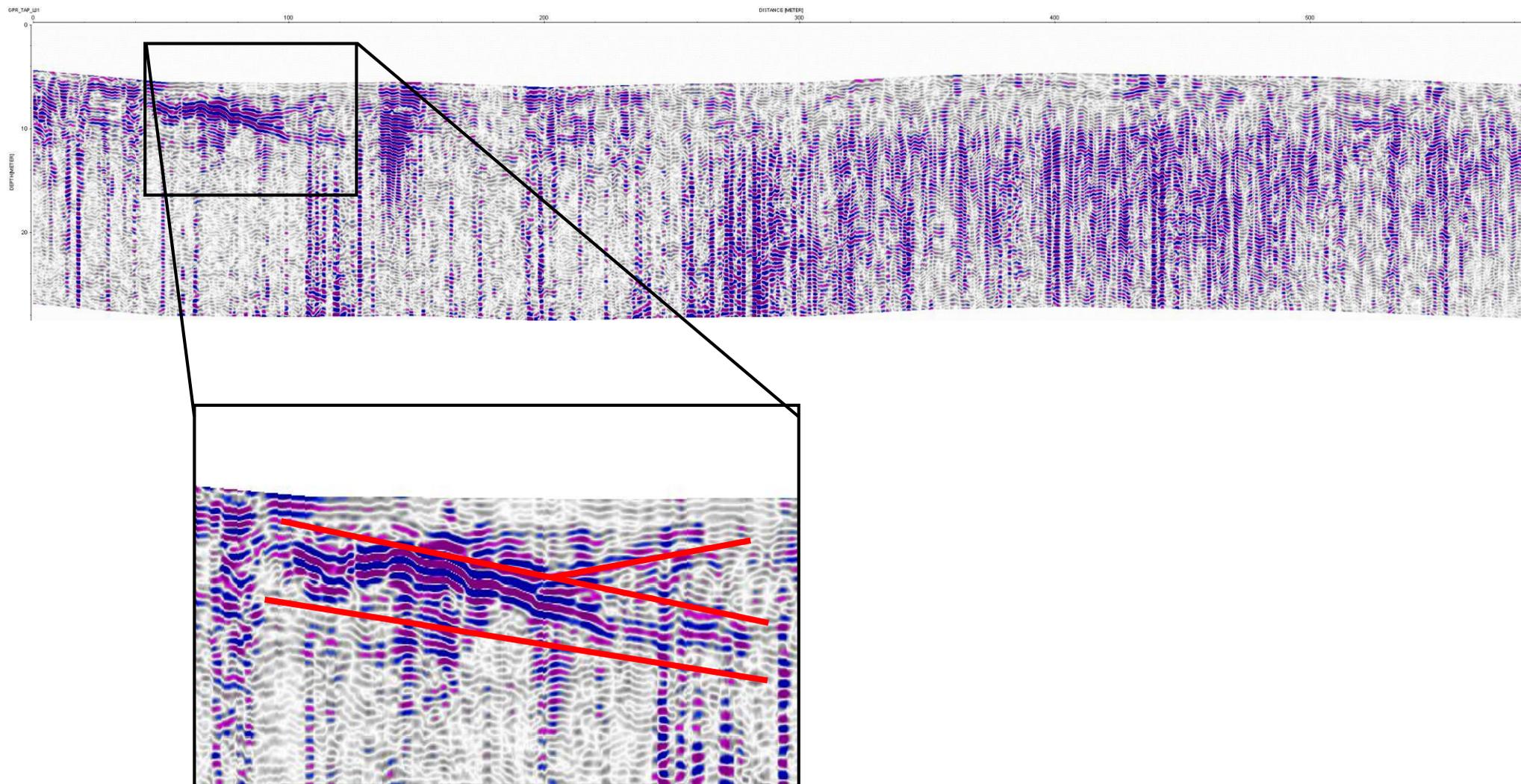


Figura 38 – Seção de GPR da linha 01 com destaque para o truncamento dos refletosres.

### 8.3.2 Seção linha 04

A aquisição da linha 04 foi realizada no maciço, na cota de 1190 metros, próxima a crista do barramento, como é possível observar na figura 39.

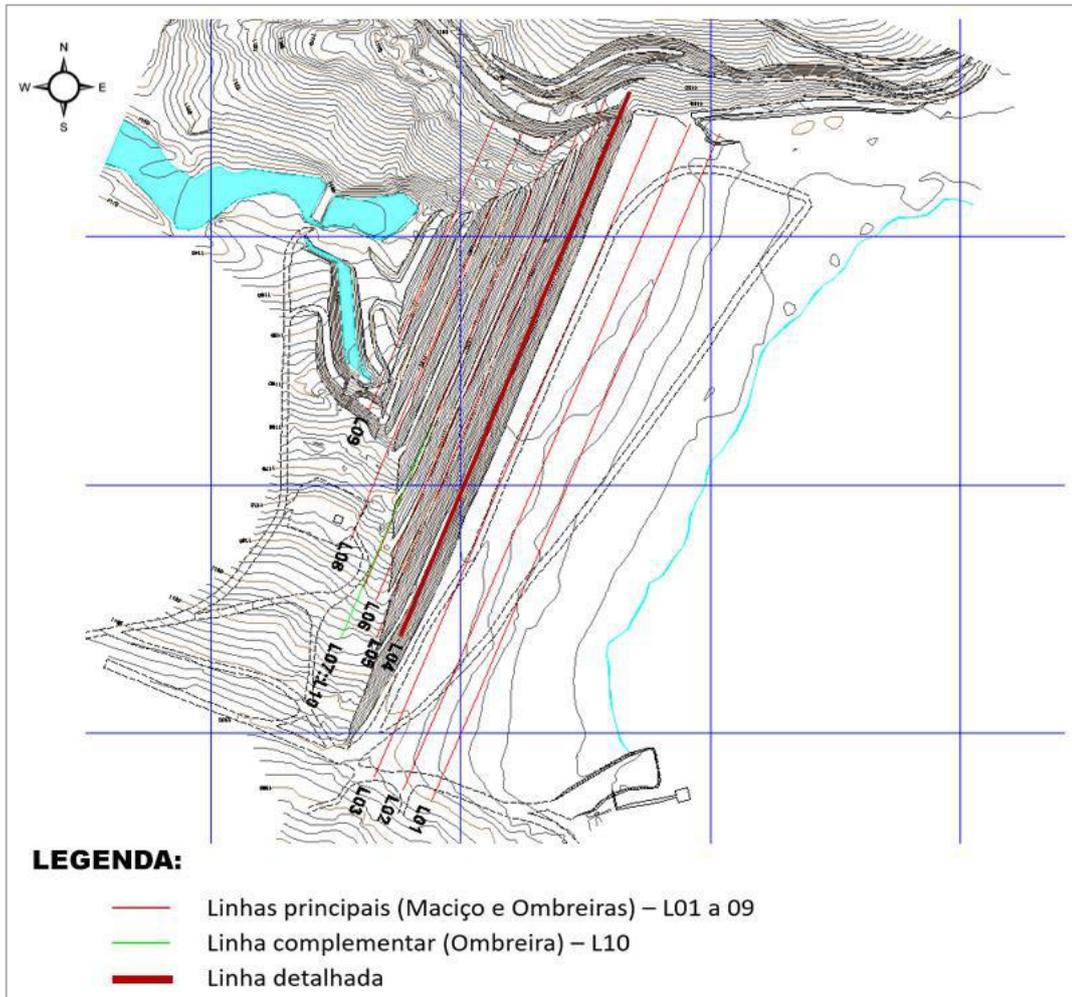


Figura 39 – Mapa de localização da linha de aquisição 04 de GPR.

Nesta seção a diferença na disposição de refletores é bem marcada, os padrões de truncamento reconhecidos na região de praia tornam-se mais contínuos lateralmente. Sendo assim, foi possível diferenciar três horizontes com diferentes padrões de refletores, estes foram demarcados na figura 40, dando ênfase para os refletores contidos entre 225 e 310 metros.

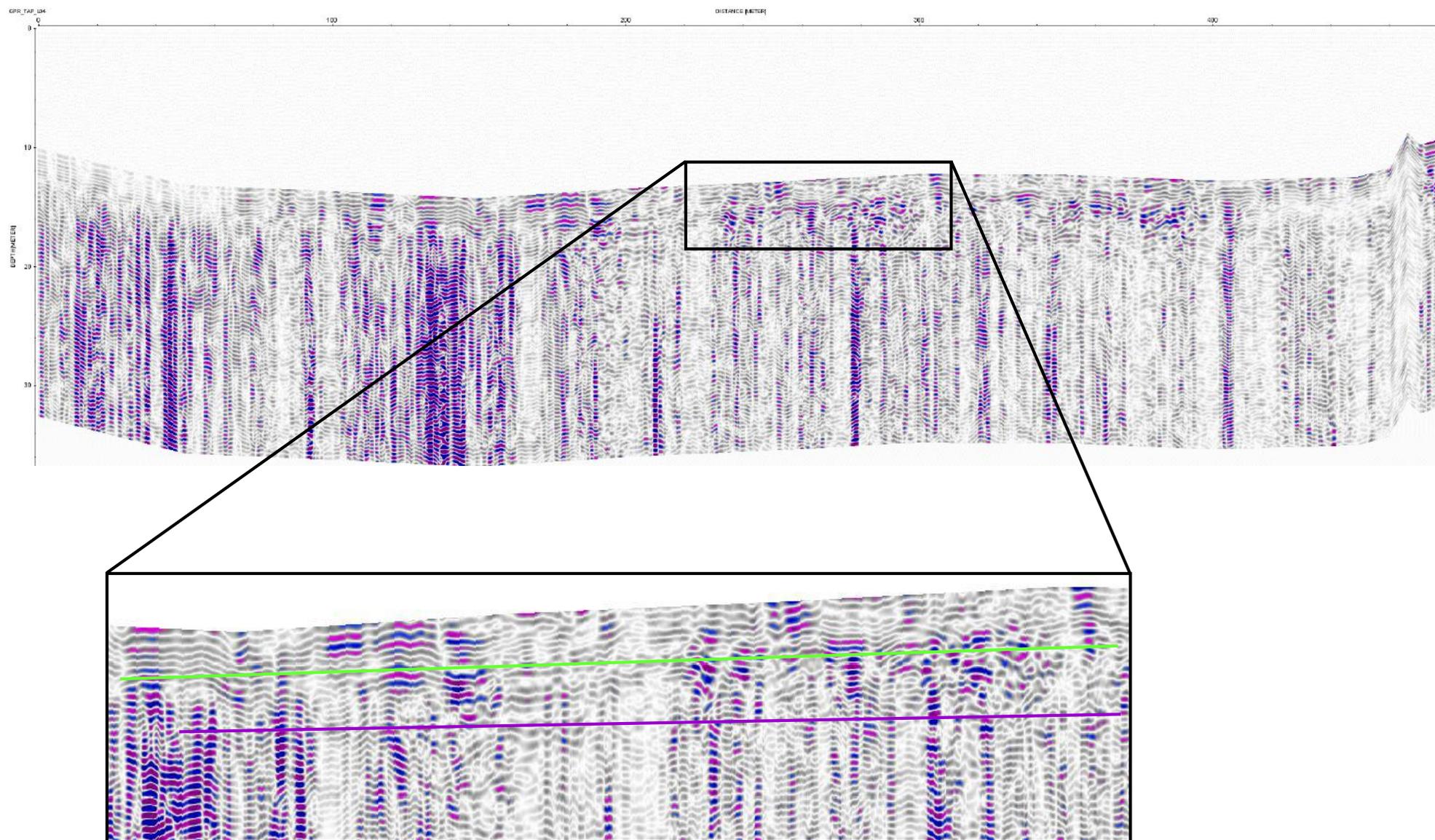


Figura 40 – Seção 04 de GPR, com destaque para os horizontes com diferentes padrões de refletores.

### 8.3.3 Seção linha 07

A linha de aquisição 07 foi adquirida no meio do maciço da barragem, próximo a quarta berma, como indicado na figura 41.

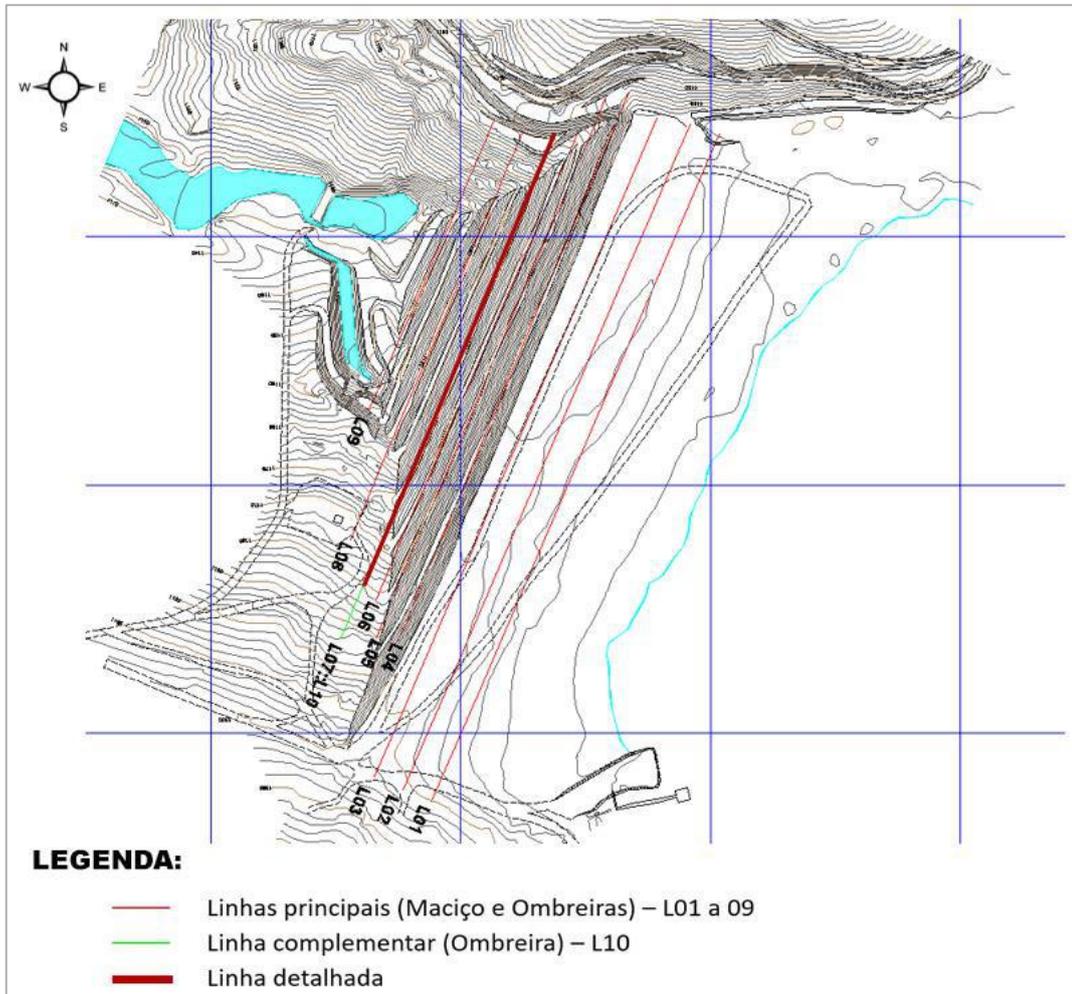


Figura 41 - Mapa de localização da linha de aquisição 07 de GPR.

Nesta seção pôde-se melhor definir os três horizontes com padrões de refletores indicados na seção anterior. Os refletores estão bem delimitados ao longo toda a seção, estes se aproximam da horizontalidade e possuem espessura quase constante, como apresentado na figura 42.

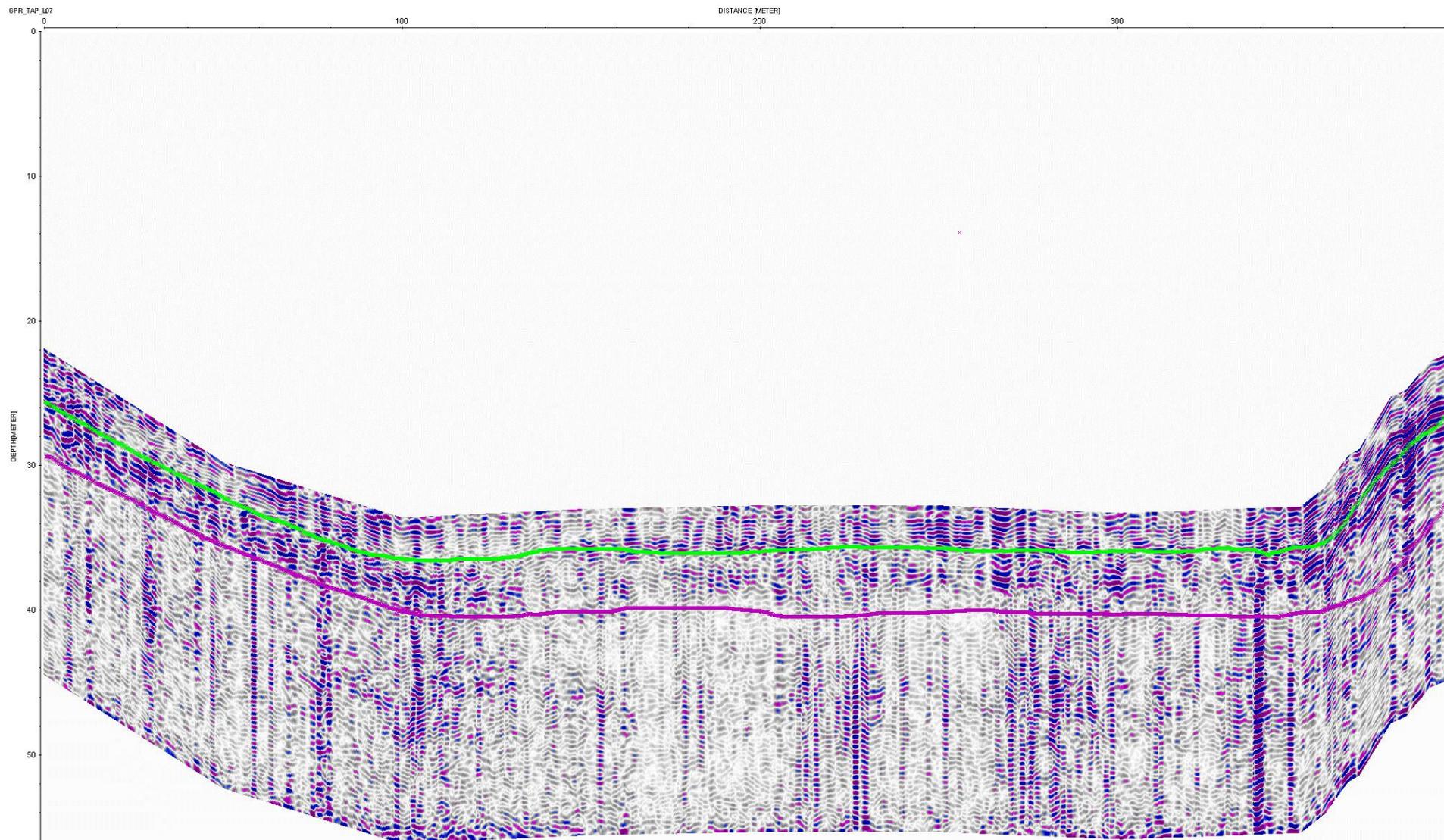


Figura 42 – Seção 07 de GPR com três horizontes com padrões distintos de refletor, tendo continuidade lateral e espessura aproximadamente constante.

#### **8.4 Correlação GPR-Eletrorresistividade**

A fim de complementar os resultados analisados individualmente nos métodos geofísicos, uma comparação entre as seções de eletrorresistividade e GPR foi proposta. A seção escolhida para representar esta comparação foi a número 04.

À primeira vista, observando a figura 43, os horizontes com diferentes padrões de refletores se correlacionam com os diferentes horizontes de respostas elétricas. Esses horizontes marcam as diferentes fases de compactação do maciço, onde as zonas mais compactadas podem ser correlacionadas possivelmente com as zonas menos resistivas utilizando a linha de raciocínio de que apenas ar preenche os poros, como por exemplo do terceiro horizonte com 20 metros de espessura.

Esses horizontes também marcam as diferentes granulometrias dos materiais de mesma composição, no caso da magnetita que compõe o maciço. Os horizontes mais arenosos apresentam-se mais resistivos, como o segundo horizonte com 4 metros de espessura, ao passo que os níveis silto-argilosos, presentes em maior profundidade, apresentam-se menos resistivos.

E principalmente, ainda é possível correlacionar os resultados com zonas com teores de umidades diferentes, as zonas com maiores teores de umidade, as mais profundas, iriam se apresentar menos resistivas que as que possuem seus poros preenchidos majoritariamente por ar, zonas próximas à superfície.

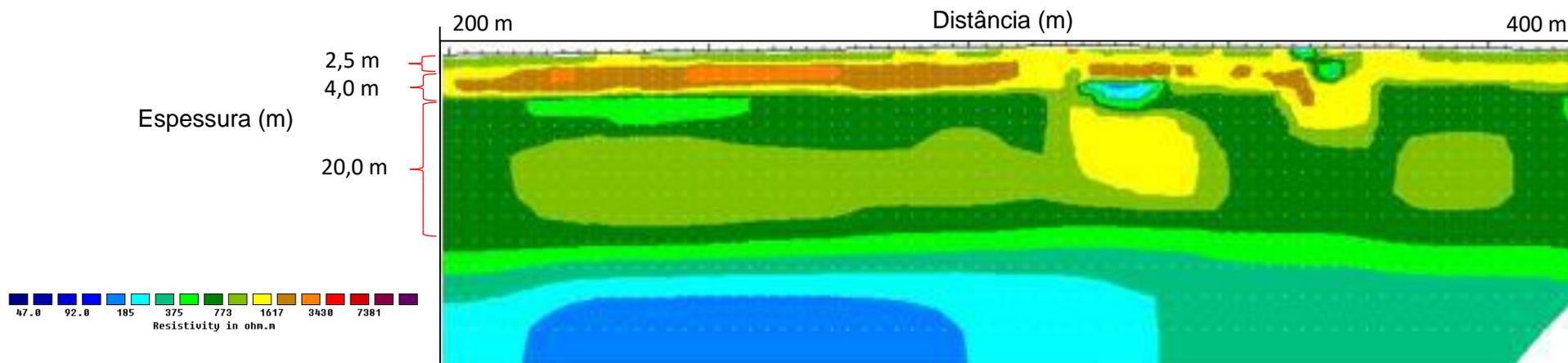
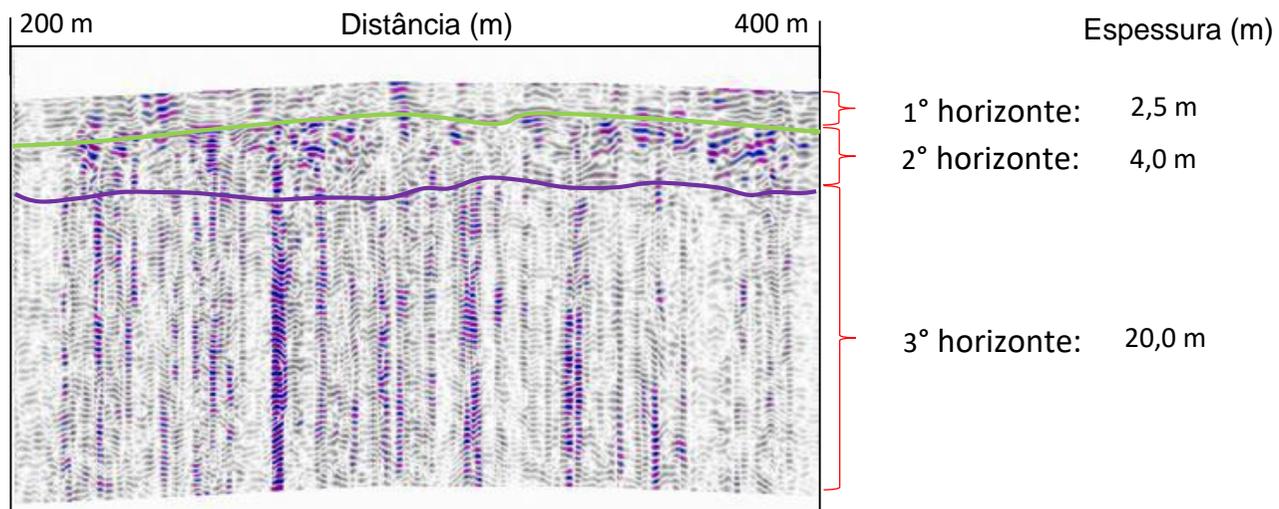


Figura 43 – Comparação entre os horizontes das seções 04 de GPR e caminhamento elétrico.

## 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista, que o objetivo principal deste trabalho é observar se os métodos geofísicos são capazes de promover uma metodologia complementar para trabalhar em conjunto com os instrumentos de monitoramento direto dispostos ao longo da barragem. Além de possibilitar um mapeamento em subsuperfície, capaz de discernir os principais materiais constituintes da barragem, e identificar zonas com maiores umidades. Estes foram alcançados, indicando, assim, a eficiência desses métodos geofísicos.

A ação integrada de mais de um método geofísico se mostrou eficaz, contribuindo para a confiabilidade dos resultados adquiridos, permitindo a observação de consistência entre eles.

O destaque fica para o método de eletrorresistividade, que apresentou resultados satisfatórios, possibilitando a indicação de zonas possivelmente saturadas em água, ou até mesmo, com um maior teor de umidade, representadas pelas Zonas de Baixa Resistividade (ZBR).

Com o *ground penetrating radar* foi possível identificar três horizontes distintos, com diferentes padrões de disposição de refletores, que correlacionados aos resultados de eletrorresistividade, indicaram que a diferença de compactação está diretamente correlacionada a diferença de resistividade presente no maciço.

Correlacionando os dados de eletrorresistividade, polarização induzida e dos instrumentos indicadores de nível d'água, foi possível indicar aproximadamente a posição do topo da superfície freática no barramento. É indiscutível que a utilização de mais seções poderia aferir os resultados acerca da posição da freática, em vista que, neste trabalho foram apenas utilizadas 3 seções de cada método.

Além disso, os métodos elétricos em conjunto permitiram a diferenciação de horizontes geofísicos e a sua correlação com os materiais constituintes do barramento. Onde as Zonas de Alta Cargabilidade e Resistividade Aparentes (ZAC e ZAR), podem ser associadas aos rejeitos de magnetita utilizados no alteamento da barragem. As Zonas de Baixa Resistividade (ZBR) e as Zonas de Baixa Cargabilidade aparentes (ZBC) podem ser relacionadas a regiões mais argilosas.

Enquanto, a associação entre zonas intermediárias, tanto de resistividade (ZIR), quanto de cargabilidade (ZIC), podem ser correlacionadas a materiais de granulometria inferior aos das Zonas de Alta Resistividade (ZAR) e das Zonas de Cargabilidade (ZAC) aparentes.

Esses resultados, demonstraram a efetividade da geofísica em discernir os principais materiais constituintes do barramento.

Como recomendação, baseado nos resultados adquiridos, fica a possibilidade de implementação da geofísica aplicada no monitoramento de barragens em geral, como sendo uma ferramenta essencial na complementação dos métodos diretos já existentes.

Para se ter uma melhor eficácia no estudo do comportamento dos fluxos d'água, compactação e outras estruturas é recomendado a utilização desse método indireto pelo menos 2 vezes ao ano, tendo assim uma análise completa anual e um melhor entendimento do comportamento hidrodinâmico da estrutura, auxiliando o monitoramento e permitindo um maior controle na segurança do maciço.

## 10. REFERÊNCIAS

- BRAGA, A. C. O. Métodos geoeletricos aplicados: Módulo: Hidrogeologia. 1 ed. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1999. 27 p.
- BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática. Rio Claro: 2006. 123 p.
- CHULA, A. M. D. Caracterização mineralógica do minério fosfático da mina de Tapira - MG. Belo Horizonte: 2004. 378 p.
- DESAI, L.; JADHAV, G.; SHINDE, V.; PATIL, S. Ground Penetrating Radar (GPR). Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), v. 2, n. 6, p. 1508-1511, 2016.
- ELIS, V. R. Produção e destinos de resíduos urbanos: problemas de contaminação ambiental. USP/Univesp: 2014. 80-95 p.
- KRAINER, K. Ground Penetrating Radar (GPR). WP6 Permafrost and Natural Hazards, 2011.
- LAGO, A. L.; GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 3, p. 357-374, abr./ago. 2006.
- NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth Science Reviews, n. 66, p. 261-330, 2004.
- GOOGLE. Google Earth, disponível em: <https://www.google.com/earth/>, acessado em 13 de jan de 2018.
- GUILBERT, R. A handbook of geophysical techniques for geomorphic and environmental research. Canada: Robert Gilbert, 1999. 125 p.
- PORSANI, J. L. Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. Diss. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 1999.

SILVA, C. H. Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais. Rio Claro-SP: 2003. 218 p.

SILVA, C. H. D.; SIMÕES, L. S. A.; DAMÁZIO, W. L.; FERREIRA, S. N.; LUVIZOTTO, G. L. O Grupo Canastra em sua área-tipo, região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais. Revista do Instituto de Geociências - USP, v. 12, n. 2, p. 83-98, nov./mai. 2012.

SUMNER, J. S. Principles of induced polarization for geophysical prospecting. 1976.

MOSAIC. VAFZ.AL-LT-FTP-103-01.16 - Auditoria técnica de segurança barragem BR. relatório de inspeção de segurança regular. Relatório de auditoria técnica de segurança, Complexo de Mineração de Tapira – MG: 2016, 41 p.

MOSAIC. Levantamento geofísico-acompanhamento – Barragem BR Tapira – MG. 2017a.

MOSAIC. Relatório fotográfico – acompanhamento – Barragem BR Tapira – MG. 2017b.

VALE FERTILIZANTES. Operações, disponível em: <http://www.valefertilizantes.com/valefertilizantes/operacoes.asp>, acessado em 13 de jan de 2018.