

LUIZ FILIPE CARÍSSIMO SOARES

**MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES
GEOTÉCNICAS EM BARRAGEM DE TERRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio G. Marques

Coorientadora: Cibele Cláuver de Aguiar

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S676m
2021

Soares, Luiz Filipe Caríssimo, 1996-

Métodos geofísicos aplicados à avaliação das condições geotécnicas em barragem de terra [recurso eletrônico] / Luiz Filipe Caríssimo Soares. – Viçosa, MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (121 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.116-121.

Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/>

1. Geofísica. 2. Barragens de terra. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed 627.83

Bibliotecário (a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB6 2523

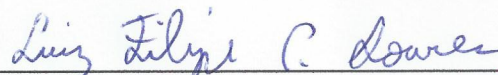
LUIZ FILIPE CARÍSSIMO SOARES

**MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS À AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES
GEOTÉCNICAS EM BARRAGEM DE TERRA**

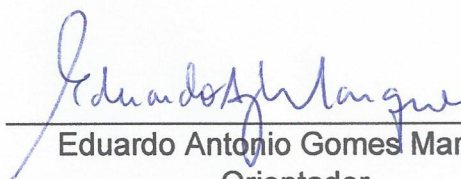
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de junho de 2021

Assentimento:



Luiz Filipe Caríssimo Soares
Autor



Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

AGRADECIMENTOS

A realização do presente estudo só foi possível devido à contribuição e boa vontade de diversas pessoas. Assim, seguem meus agradecimentos:

Primeiramente, a Deus, por mais essa etapa da minha formação que estou concluindo.

A minha família, pelo amor e apoio incondicionais que foram meu porto seguro por toda a vida.

Aos amigos, que vou levar para a vida toda, da República Kero-Kero, por serem os melhores companheiros que eu poderia ter, nos bons e nos maus momentos.

À universidade Federal de Viçosa, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por disponibilizar os recursos e os profissionais capacitados que foram essenciais para a elaboração deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Eduardo Antonio Gomes Marques, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e pela disposição em me auxiliar em todas as minhas dúvidas e necessidades.

À professora Cibele Cláuver de Aguiar, por ter me apresentado a ciência da Geofísica, pela orientação constante, tanto para os estudos quanto para a vida, por todas as portas que me foram abertas, por todo o incentivo e todas as broncas que ajudaram a moldar o profissional e a pessoa na qual eu me tornei.

À Neogeo Geotecnologia, de Belo Horizonte, por fornecer os equipamentos e os softwares utilizados neste estudo, e pelo apoio dos seus excelentes profissionais, com os quais pude aprender muito.

Ao meu amigo Thiago Guerra Peixe, por fazer parte da equipe de trabalho deste estudo.

Ao professor Daniel Camilo de Oliveira Duarte, por disponibilizar a imagem aérea georreferenciada que foi utilizada neste estudo

Aos profissionais do Laboratório de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da UFV, por auxiliar no georreferenciamento da área de estudo.

Por fim, a todos que contribuíram de qualquer forma e não foram citados, minhas sinceras desculpas.

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

RESUMO

SOARES, Luiz Filipe Caríssimo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2021. **Métodos geofísicos aplicados à avaliação das condições geotécnicas em barragem de terra.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientadora: Cibele Cláuver de Aguiar.

A avaliação das condições de segurança de qualquer estrutura geotécnica tem como etapa fundamental a investigação dos fenômenos responsáveis pela diminuição da sua estabilidade. No caso das barragens de terra, foram desenvolvidos ao longo do tempo diversos instrumentos capazes de monitorar as condições de fluxo, poropressões e deformações no maciço, aplicando técnicas que por vezes se mostram invasivas e onerosas. Quando aliados às investigações convencionais, os métodos geofísicos representam uma opção mais eficiente para a execução de investigações geotécnicas, já que a sua aplicação permite a coleta de uma grande quantidade de dados em um curto intervalo de tempo e a um custo relativamente baixo. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal o estudo das condições geológico-geotécnicas do maciço de uma barragem de terra de pequeno porte, através da integração dos resultados obtidos com a aplicação dos métodos geofísicos da Eletrorresistividade, Potencial espontâneo e Radar de penetração no solo, além de investigações diretas e ensaios de laboratório. Os resultados obtidos comprovam a eficácia da metodologia proposta, com a integração dos resultados obtidos pelos diferentes métodos permitindo a confirmação ou o descarte das hipóteses criadas e gerando interpretações melhor embasadas. Com relação à segurança do maciço, foram identificadas três regiões que merecem atenção em estudos futuros.

Palavras-chave: Investigações geofísicas. Barragens de terra. Interpretação integrada.

ABSTRACT

SOARES, Luiz Filipe Caríssimo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2021. **Geophysical survey applied to the evaluation of geotechnical conditions of an earth dam.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-adviser: Cibele Cláuver de Aguiar.

The evaluation of the safety condition on any geotechnical structure has, as a key part, the investigation of the phenomena responsible for the decrease in its stability. In the case of earth dams, several instruments have been developed over time to monitor the flow conditions, pore pressures and embankment deformations, applying techniques which are sometimes invasive and high-costly. When combined with conventional investigations, geophysical surveys represent a more efficient option for carrying out geotechnical surveys, since its usage allows the acquirement of a large amount of data over a short period of time and at a relatively low cost. Given the background, the present study aimed the evaluation of the geological and geotechnical conditions on the massif of a small earth dam, through the integration of results obtained by the application of the geophysical methods of Electrical resistivity, Self-Potential and Ground penetration radar, along with direct investigations and laboratory tests. The results prove the effectiveness of the proposed methodology, with the integration of the results obtained by different methods allowing the confirmation or discarding of the created hypotheses and also generating better grounded interpretations. Regarding the safety of the embankment, three of the identified features deserve better attention in future studies.

Keywords: Geophysical surveys. Earth dams. Integrated interpretation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mecanismos responsáveis pela ocorrência de piping.	19
Figura 2: Exemplo de ruptura por galgamento.	20
Figura 3: Sequência do processo de liquefação.....	22
Figura 4: Ruptura por liquefação de barragem em Merriespruit, África do Sul.....	22
Figura 5: Esquema do fenômeno do deslizamento de taludes.....	23
Figura 6: Condições que afetam a forma da superfície de ruptura.....	24
Figura 7: Distribuição dos pontos coletados para a construção de uma pseudo-seção 2D de eletrorresistividade.....	31
Figura 8: Esquema do arranjo de Schlumberger.....	32
Figura 9: Esquema do arranjo Wenner.	32
Figura 10: Esquema do arranjo dipolo-dipolo.....	33
Figura 11: Esquema do arranjo Polo-Polo.	34
Figura 12: Esquema do arranjo Gradiente.	35
Figura 13: Esquema de uma anomalia SP devido à percolação de água.	37
Figura 14: Anomalias negativas de SP geradas por estruturas subterrâneas.....	38
Figura 15: Esquema da técnica dos gradientes.	39
Figura 16: Esquema da técnica dos potenciais.	39
Figura 17: Exemplo de geração do traço de uma onda eletromagnética captada.....	41
Figura 18: Esquema da técnica dos perfis de reflexão com afastamento constante.....	42
Figura 19: Esquema da técnica CMP.....	42
Figura 20: Esquema da técnica WARR.....	43
Figura 21: Exemplo do processo de ajuste de hipérbolas em radargramas.....	43
Figura 22: Perfil geoeletrico evidenciando os contatos entre diferentes materiais no dique de Sant Llorenç de Montgai.....	44
Figura 23: Perfil de GPR evidenciando os contatos entre diferentes materiais no dique de Sant Llorenç de Montgai.....	45

Figura 24: Seção de eletrorresistividade obtida na barragem de Cordeirópolis.	45
Figura 25: Resultado do levantamento de SP realizado na barragem de Cordeirópolis.	46
Figura 26: Geração de anomalias negativas de potencial espontâneo em zonas de fluxo concentrado em barragens de terra.....	47
Figura 27: Seção de GPR evidenciando a presença de cavidades próximas à superfície.....	48
Figura 28: Correlação entre a resistividade e o valor de N para uma argila arenosa.	49
Figura 29: Correlação entre o valor N e a resistividade elétrica.	50
Figura 30: Correlação entre teor de umidade e resistividade elétrica.	50
Figura 31: Valores de teor de umidade volumétrica plotados em função da resistividade elétrica, para os horizontes A (a) Bw (b) e C (c).....	51
Figura 32: Localização do Campus Viçosa da UFV.	55
Figura 33: Vista aérea da barragem e do seu entorno.	55
Figura 34: Relevo do local estudado.	57
Figura 35: Vista do local onde foi identificada a cavidade erosiva.	58
Figura 36: Seção transversal da barragem.	59
Figura 37: Configuração geométrica das linhas de investigação geofísica.	62
Figura 38: Equipamentos utilizados na aquisição dos dados de eletrorresistividade 2D.....	64
Figura 39: Eletrodos posicionados em uma das linhas de investigação.	64
Figura 40: Detalhe dos eletrodos cravados no solo.	65
Figura 41: Aplicação da solução salina nos eletrodos.....	65
Figura 42: Esquema da técnica do roll-along.	66
Figura 43: Efeito da ausência dos eletrodos correspondentes à posição do vertedouro na linha L01.....	67
Figura 44: Vista aérea da barragem, com destaque para a posição do eletrodo fixo.	68
Figura 45: Resistivímetro usado na medição do potencial espontâneo.	69

Figura 46: Preparação dos eletrodos não polarizados.	69
Figura 47: Posicionamento do eletrodo fixo.	69
Figura 48: Calibração das medidas com o multímetro.	70
Figura 49: Radar utilizado na aquisição de dados do método GPR.	71
Figura 50: Radar sendo operado em campo pela equipe de trabalho.....	72
Figura 51: Gráfico potencial versus posição do eletrodo para a linha L02.	74
Figura 52: Método gráfico para a localização da fonte de anomalia de SP.....	76
Figura 53: Aplicação da técnica da adaptação hiperbólica na linha L01.1.	77
Figura 54: Pontos onde foram realizados os ensaios SPT.....	78
Figura 55: Localização do poço de captação de água.	79
Figura 56: Resultado da modelagem numérica do fluxo subsuperficial entre o reservatório e o poço, durante seu funcionamento.	80
Figura 57: Vista aérea da barragem, destacando a localização dos furos de sondagem a trado executados.....	81
Figura 58: Equipamentos utilizados na campanha de sondagens a trado.	82
Figura 59: Material tomado para sedimentação, mantido em repouso em solução de hexametáfosfato de sódio.	83
Figura 60: Material transferido para a proveta, para a execução das leituras do densímetro.	84
Figura 61: Dispersão de solo transferida para o picnômetro, para determinação da massa específica dos sólidos.....	85
Figura 62: Seções 2D de resistividade elétrica para as linhas L01 a L05.	87
Figura 63: Seções 2D de resistividade elétrica para as linhas L06 a L08.	88
Figura 64: Distribuição dos valores de potencial espontâneo ao longo da área estudada.....	90
Figura 65: Radargramas referentes às linhas L01 a L05.	93
Figura 66: Radargramas referentes às linhas L06 a L08.	94
Figura 67: Detalhe da superfície de contato identificada.....	95
Figura 68: Detalhe dos pulsos destacados.	96

Figura 69: Coerência entre a ZC3 e a superfície de contato do radargrama, para a linha L01.....	99
Figura 70: Radargrama da linha L07, indicando a granulometria das amostras de solo coletadas.....	100
Figura 71: Canal de escoamento em funcionamento durante um período chuvoso.....	101
Figura 72: Correlação entre a AN2 e a hipérbole nos radargramas das linhas L06 e L07.....	102
Figura 73: Correlação entre a ZAC e uma hipérbole nos radargramas das linhas L06 e L07.....	104
Figura 74: Registro da surgência da tubulação metálica.....	105
Figura 75: Correlação entre a ZR2 e os pulsos nos radargramas indicando vazios.....	106
Figura 76: Formigueiro e árvores de grande porte identificados no talude de jusante da barragem.....	107
Figura 77: Correlação entre os resultados dos ensaios SPT e do levantamento de eletrorresistividade.....	108
Figura 78: Resultados do modelo de correlação entre os valores de N-SPT e resistividade elétrica, para a camada de aterro.....	110
Figura 79: Correlação entre a ZC2 e a AN1.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das características dos métodos geofísicos.....	28
Tabela 2: Modelos de correlação entre teor de umidade volumétrica e resistividade, obtidos por Ferreira et al. (2021).....	52
Tabela 3: Modelos empíricos correlacionando o teor de umidade e a constante dielétrica.....	53
Tabela 4: Quantitativo das chuvas no mês de dezembro/2019.....	61
Tabela 5: Linhas definidas para a aplicação das investigações geofísicas.....	62
Tabela 6: Resumo das linhas de Eletrorresistividade 2D executadas.....	66
Tabela 7: Coordenadas do eletrodo fixo do levantamento de SP.	68
Tabela 8: Resumo das linhas de potencial espontâneo executadas.....	70
Tabela 9: Resumo das linhas de GPR executadas.....	72
Tabela 10: Coordenadas dos pontos onde foram realizados os ensaios SPT.	78
Tabela 11: Informações sobre as amostras de solo coletadas na campanha de sondagem a trado.	82
Tabela 12: Resultados da análise granulométrica das amostras de solo coletadas.	97
Tabela 13: Resultados da localização da estrutura enterrada.	103
Tabela 14: Valores de N-SPT e eletrorresistividade, para a camada de aterro.....	109
Tabela 15: Resultados da localização da fonte da anomalia AN1.....	113

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NA	Anomalia negativa de potencial espontâneo
ANA	Agência Nacional de Águas
CMP	Common Mid Point
EM	Ondas eletromagnéticas
GPR	Ground penetration radar (Radar de penetração no solo)
MASW	Multichannel Analysis of Surface Waves
NBR	Norma Técnica brasileira
SAAE	Serviço Autônomo de Águas e Esgoto
SEV	Sondagem elétrica vertical
SEVME	Sondagem elétrica vertical multi eletrodos
SP	Self potential (Potencial espontâneo)
SPT	Standart Penetration Test
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UTM	Universal Transversa de Mercator
VERT	Vertedouro
WARR	Wide Angle Reflection and Refraction
ZAC	Zona anomalmente condutiva
ZAR	Zona anomalmente resistiva
ZF	Zona de fluxo subsuperficial de baixa profundidade
ZC	Zona eletricamente condutiva
ZR	Zona eletricamente resistiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Objetivos do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Mecanismos de ruptura de barragens.....	18
2.1.1	Piping.....	18
2.1.2	Galgamento ou overtopping	19
2.1.3	Liquefação	20
2.1.4	Deslizamento de talude	22
2.1.5	Identificação de patologias em barragens de terra.....	25
2.2	Investigações geofísicas	25
2.2.1	Definição e generalidades	25
2.2.2	Tipos de investigações geofísicas	26
2.2.3	Método da eletrorresistividade.....	28
2.2.4	Método do potencial espontâneo (SP).....	35
2.2.5	Radar de penetração no solo (GPR)	40
2.3	Investigações geofísicas aplicadas em barragens de terra.....	43
2.4	Correlação entre dados geofísicos e parâmetros geotécnicos.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1	A barragem estudada.....	54
3.2	Inspeção visual no maciço da barragem	59
3.3	Investigações geofísicas realizadas	60
3.3.1	Eletrorresistividade	62
3.3.2	Potencial espontâneo	67
3.3.3	GPR.....	70
3.4	Processamento dos dados geofísicos.....	73
3.4.1	Eletrorresistividade	73
3.4.2	Potencial espontâneo	74

3.4.3	GPR.....	76
3.5	Aquisição de dados geotécnicos.....	77
3.5.1	Consulta bibliográfica a trabalhos anteriores.....	77
3.5.2	Coleta de amostras de solo.....	80
3.5.3	Análise granulométrica.....	83
4	Resultados e discussões.....	86
4.1	Eletrorresistividade.....	86
4.2	Potencial espontâneo.....	90
4.3	GPR.....	91
4.4	Análise granulométrica.....	96
4.5	Interpretações integradas.....	98
4.5.1	Identificação de superfície de contato.....	98
4.5.2	Identificação de uma estrutura enterrada.....	101
4.5.3	Identificação de uma tubulação subterrânea.....	103
4.5.4	Identificação de zona alterada pela ação de agentes biológicos.....	105
4.5.5	Correlação entre os resultados dos ensaios SPT e do levantamento de eletrorresistividade.....	107
4.5.6	Identificação de zona de fluxo intenso.....	111
5	Conclusões.....	114
	REFERÊNCIAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A avaliação das condições geotécnicas e segurança estrutural dos maciços de barragens de terra é um assunto de grande importância e interesse tanto para a Geotecnia quanto para a Sociedade. Surge, assim, a necessidade de se analisar quais fenômenos contribuem para o aumento ou a diminuição da segurança dessas estruturas.

Uma das práticas mais indicadas e eficazes para o bom gerenciamento da operação de uma barragem de terra é o monitoramento contínuo dessa estrutura. Nesse contexto, foram desenvolvidos diversos instrumentos, métodos e técnicas com o objetivo de relacionar as características geotécnicas e geológicas dos maciços das barragens ao seu nível de integridade estrutural.

Cruz (2004) destaca que os principais objetivos da instrumentação de barragens são a verificação das hipóteses e critérios adotados em projeto, da adequação dos métodos construtivos utilizados e das condições de segurança da obra, permitindo a adoção de medidas corretivas em tempo hábil.

Entre os principais instrumentos desenvolvidos para o monitoramento de barragens destacam-se (CRUZ, 2004):

- Os medidores de nível d'água, que tem como objetivo indicar a cota do nível d'água em um furo de sondagem ou poço, que pode ou não ser revestido, com a leitura sendo feita com o auxílio de um sensor elétrico acoplado a um cabo;
- Os piezômetros, que são utilizados para medir a poropressão em um ponto específico de interesse no maciço;
- Medidores de recalque, que medem os deslocamentos verticais absolutos, em relação a um ponto de referência, da fundação ou do maciço;
- Inclinômetros, que medem os deslocamentos horizontais, tanto superficiais quanto em subsuperfície.

As investigações realizadas através dos instrumentos citados anteriormente

são chamadas de investigações diretas, nas quais é necessário que os instrumentos entrem em contato direto com o subsolo do local investigado. Complementarmente, vem ganhando espaço a utilização de equipamentos que aplicam métodos indiretos para a realização do monitoramento dessas estruturas. Nesse contexto, ganham destaque os métodos geofísicos, que tem como principais aplicações o mapeamento da superfície freática e a identificação de camadas de materiais com propriedades distintas.

Dentre as vantagens proporcionadas pela aplicação dos métodos geofísicos em uma investigação geotécnica, destaca-se a possibilidade de execução de investigações em áreas de difícil acesso. Nessas áreas, a execução de furos de sondagem seria praticamente impossível, devido ao risco gerado aos trabalhadores e à comunidade ao redor da área investigada, e o transporte dos equipamentos pesados utilizados nas investigações diretas se torna muito problemático. Além disso, os dados coletados utilizando-se os métodos geofísicos possibilitam a geração de modelos em duas ou três dimensões, contribuindo para uma análise mais completa e precisa dos problemas de engenharia que podem ocorrer no maciço (FIGUEIREDO, 2017).

Outra vantagem é o fato de que esses métodos não são invasivos, deixando a estrutura do maciço intacta após a sua utilização, não apresentando riscos à redução da sua estabilidade. Cruz (2004) relata que a execução de perfurações pode gerar a ocorrência de fraturamento hidráulico no maciço, devido à injeção de água sob pressão, abrindo trincas no solo, por exemplo.

Apesar das vantagens citadas anteriormente, Kearey et al. (2009) destacam que a aplicação de métodos geofísicos não dispensa a necessidade de perfurações no solo para a aplicação dos métodos diretos, mas minimiza a quantidade requerida dessas perfurações. Assim, os métodos geofísicos devem ser utilizados como um meio relativamente rápido e barato de se obter informações distribuídas em área e/ou volume, além de detectar características locais de interesse que não podem ser facilmente encontradas em investigações convencionais.

Destaca-se ainda que as investigações geofísicas podem ser aplicadas no levantamento de informações específicas sobre o maciço investigado, assim como no seu monitoramento contínuo ao longo do tempo, sendo válidas nos dois casos as

vantagens e as ressalvas citadas acima.

Assim, ao se integrar os dados obtidos nos métodos geofísicos àqueles dos métodos diretos, tradicionalmente utilizados, busca-se uma melhor relação custo-benefício no monitoramento dos maciços das barragens de terra. Além disso, essa integração permite a análise de uma maior quantidade de informações para fundamentar a tomada de decisões acerca de quais medidas, preventivas ou corretivas, devem ser tomadas para corrigir eventuais problemas de engenharia envolvendo a segurança da estrutura.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar as condições geológico-geotécnicas de um maciço de barragem de terra, através da integração dos resultados obtidos com a aplicação de métodos geofísicos, investigações diretas e ensaios de laboratório.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Indicação do posicionamento da superfície freática no maciço da barragem e parte do seu entorno;
- Identificação e caracterização de camadas de diferentes materiais que compõem o maciço da barragem e sua fundação;
- Mapeamento de objetos e estruturas enterrados que possam ser identificados pelas investigações geofísicas;
- Mapeamento elétrico do fluxo de água pelo maciço da barragem, com indicações de possíveis direções de fluxo;
- Integrar e correlacionar os resultados de investigações diretas e indiretas para avaliar as propriedades geotécnicas dos materiais que compõem o maciço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentadas sínteses de trabalhos anteriores, cujas contribuições foram a base de construção de conhecimento do presente trabalho.

São abordados inicialmente os principais mecanismos de ruptura de barragens de terra, já que a área de estudo do presente trabalho corresponde a uma estrutura desse tipo. Além disso, são apresentados os diferentes métodos geofísicos, dando ênfase tanto para o embasamento teórico quanto para aplicações práticas dos três métodos utilizados neste trabalho (resistividade elétrica, potencial espontâneo e radar de penetração no solo). Por fim são apresentados modelos de correlação entre as propriedades geofísicas e parâmetros geotécnicos para diversos tipos de solo, obtidos por diferentes autores.

2.1 Mecanismos de ruptura de barragens

Os principais mecanismos que podem levar barragens de terra a ruptura são descritos a seguir.

2.1.1 Piping

O fenômeno do piping em barragens de terra consiste em uma forma de erosão interna que resulta na formação de um canal, através do qual a água percola de forma contínua, entre a porção de montante e jusante do maciço da barragem ou sua fundação (FELL e FRY, 2007).

A ocorrência da erosão interna pode ser dividida em quatro categorias, de acordo com os mecanismos responsáveis por desencadear esse processo (ROBBINS e GRIFFITHS, 2018):

- Escoamento concentrado: Processo no qual a água flui livremente ao longo de aberturas no maciço, como fraturas ou escavações feitas por animais, erodindo o solo ao longo das bordas dessas aberturas;
- Erosão regressiva: Processo no qual canais de erosão, que são criados quando as forças de percolação são suficientemente altas, progridem

em direção à montante provocando o carreamento das partículas sólidas. Geralmente associado à fundação do maciço, quando esta é composta por material arenoso;

- Instabilidade interna: Ocorre quando o processo de percolação de água é capaz de carrear as partículas mais finas presentes em uma matriz de solo mais grosseira. Pode ser subdividida em sufusão (quando não ocorre variação de volume) e sufosão (quando ocorre variação de volume);
- Erosão de contato: Ocorre quando o processo de percolação ao longo de um material grosseiro provoca a erosão de um material adjacente, em contato com o primeiro, composto por partículas mais finas.

Um esquema dos quatro mecanismos responsáveis pela ocorrência de piping é mostrado na Figura 1.

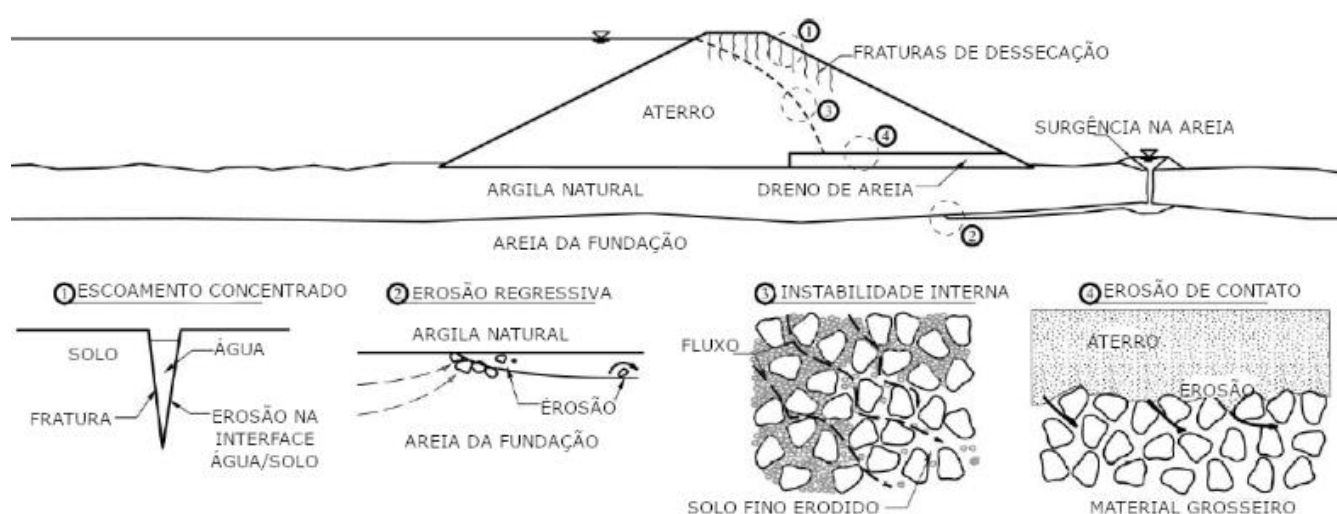


Figura 1: Mecanismos responsáveis pela ocorrência de piping.

Fonte: Adaptado de Robbins e Griffiths (2007).

2.1.2 Galgamento ou overtopping

O fenômeno do galgamento ocorre quando o nível d'água do reservatório se eleva além da cota da crista da barragem (ANA, 2012). Esse fenômeno pode gerar um processo de erosão no talude de jusante, carreando as partículas do solo superficial e comprometendo a segurança da estrutura (CRUZ, 2004).

Geralmente o processo de galgamento em barragens é provocado pela

ocorrência de chuvas muito intensas, que produzem cheias nos cursos d'água superiores à capacidade de extravasão do vertedouro da barragem. Outra causa pode ser a ruptura de outra barragem a montante, de modo que o barramento a ser galgado é incapaz de amortizar e verter todo volume advindo da barragem de montante, elevando-se o nível acima da cota da crista e podendo provocar uma ruptura em cascata (ANA, 2012).

A Figura 2 mostra um exemplo de ruptura por galgamento em uma barragem de terra.



Figura 2: Exemplo de ruptura por galgamento.

Fonte: Santana e Maniçoba (2019).

2.1.3 Liquefação

O fenômeno da liquefação consiste na perda substancial de resistência, que ocorre tipicamente em solos arenosos, devido a um aumento significativo das poropressões em condições não drenadas. Em casos extremos, a massa de solo pode mudar do estado sólido para o liquefeito (CASAGRANDE, 1976).

O processo de liquefação pode ser caracterizado pelas seguintes etapas (PEREIRA, 2005):

- Em uma massa saturada de solo granular fofo, ocorre uma mudança

brusca na estrutura dos grãos, devido a carregamentos (estáticos ou dinâmicos) muito rápidos, tendendo a um arranjo mais compacto entre partículas;

- A água intersticial, sem tempo de ser drenada, é confinada sob elevadas pressões, não permitindo, assim, a aproximação das partículas sólidas, o que reduz as tensões de contato (e conseqüentemente a força de atrito) entre essas partículas;
- Numa condição limite, as poropressões tornam-se tão elevadas que ocorre uma enorme perda do contato entre as partículas do solo que, ficando com uma resistência muito baixa, passa a se comportar como fluido viscoso, resultando no fenômeno de liquefação e na sua ruptura.

Casagrande (1976) divide o fenômeno da liquefação em dois fenômenos com características distintas:

- A liquefação verdadeira, que ocorre em areias fofas e saturadas, caracterizada por um aumento sensível nas poropressões quando são aplicadas cargas estáticas em condições não drenadas;
- A liquefação cíclica, que ocorre em areias compactas e saturadas submetidas a carregamentos cíclicos (dinâmicos), caracterizada pelo aumento gradual das poropressões a cada ciclo de carregamento.

A distinção entre as areias fofas e saturadas é feita a partir do valor dos seus índices de vazios. Casagrande (1976) define o índice de vazios crítico como o valor do índice de vazios correspondente a um arranjo estável dos grãos, que depende da pressão normal aplicada sobre a massa de areia. Tanto as areias fofas quanto as compactas tendem a este estado quando submetidas a ensaios de cisalhamento. Assim, areias fofas possuem um índice de vazios maior do que o valor crítico, enquanto areias compactas apresentam um valor menor do que o crítico.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, um esquema da sequência do processo de liquefação e um exemplo da ocorrência desse fenômeno. Nota-se, na Figura 3, que a magnitude das poropressões geradas em cada etapa do processo são representadas pela altura da coluna de água, indicada pela barra de cor escura.

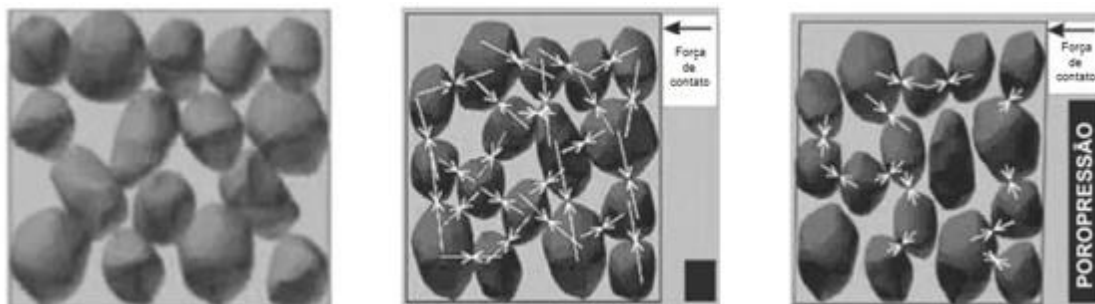


Figura 3: Sequência do processo de liquefação.

Fonte: Pereira (2005).

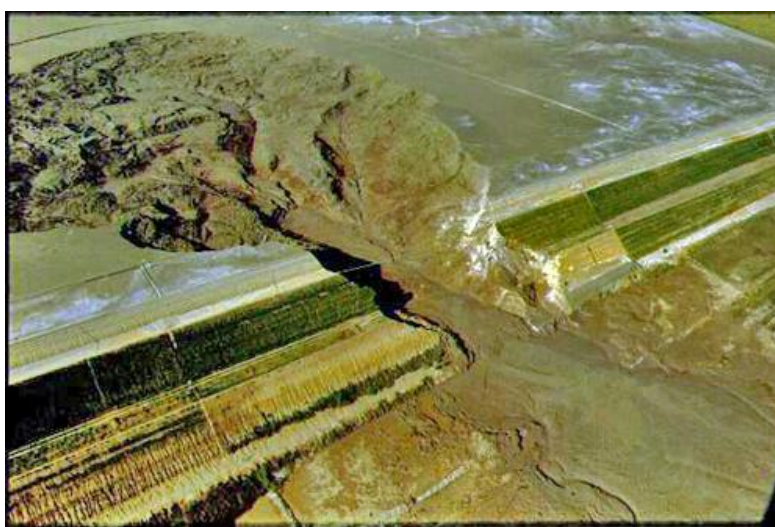


Figura 4: Ruptura por liquefação de barragem em Merriespruit, África do Sul.

Fonte: Vargas (2019).

2.1.4 Deslizamento de talude

O fenômeno do deslizamento de taludes em barragens de terra ocorre quando as forças atuantes sobre um determinado plano de ruptura que corta o corpo do maciço superam as forças resistentes. Como consequência desse desequilíbrio de forças, toda a massa de solo acima da superfície de ruptura se movimenta, provocando grandes deformações no corpo da barragem (KUTZNER, 1997). Um esquema desse fenômeno é mostrado na Figura 5.

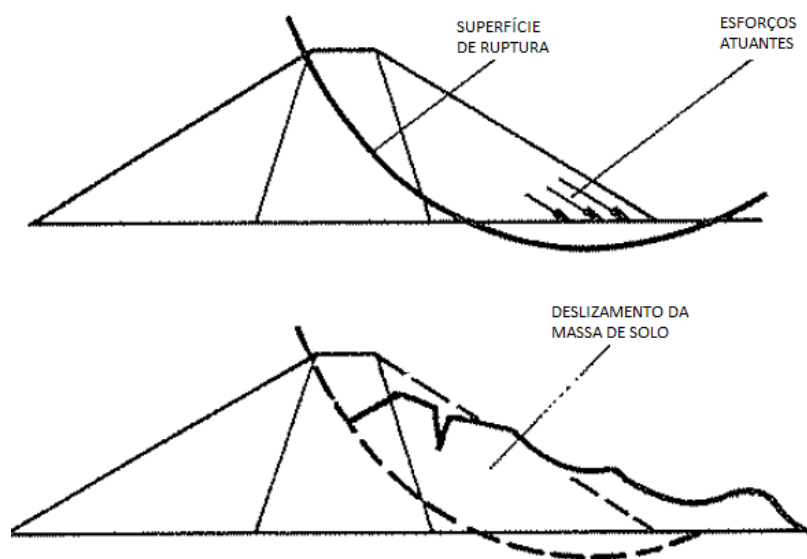


Figura 5: Esquema do fenômeno do deslizamento de taludes.

Fonte: adaptado de Kutzner (1997).

Morgenstern e Price (1965) apontam que a determinação da superfície de ruptura depende da análise das forças de corpo e das poropressões atuando no maciço, assim como dos materiais utilizados na construção da barragem. Em barragens nas quais tanto o maciço quanto a fundação são homogêneos, a superfície de ruptura tem forma circular, e o escorregamento da massa de solo se dá na forma de uma rotação de corpo rígido. Já configurações em que os materiais não são homogêneos alteram a forma da superfície de ruptura, com o deslizamento da massa de solo induzindo altas tensões cisalhantes, formando uma depressão no corpo do maciço.

Entre as condições que podem afetar a forma da superfície de ruptura, destacam-se (MORGENSTERN E PRICE, 1965):

- A presença de uma camada mole na fundação, que induz a superfície de ruptura a passar por essa camada;
- A utilização de diferentes tipos de solo ou rocha no maciço, com a curvatura da superfície de ruptura variando com a resistência de cada material;
- A utilização de tapetes drenantes.

A Figura 6 ilustra as condições descritas anteriormente.

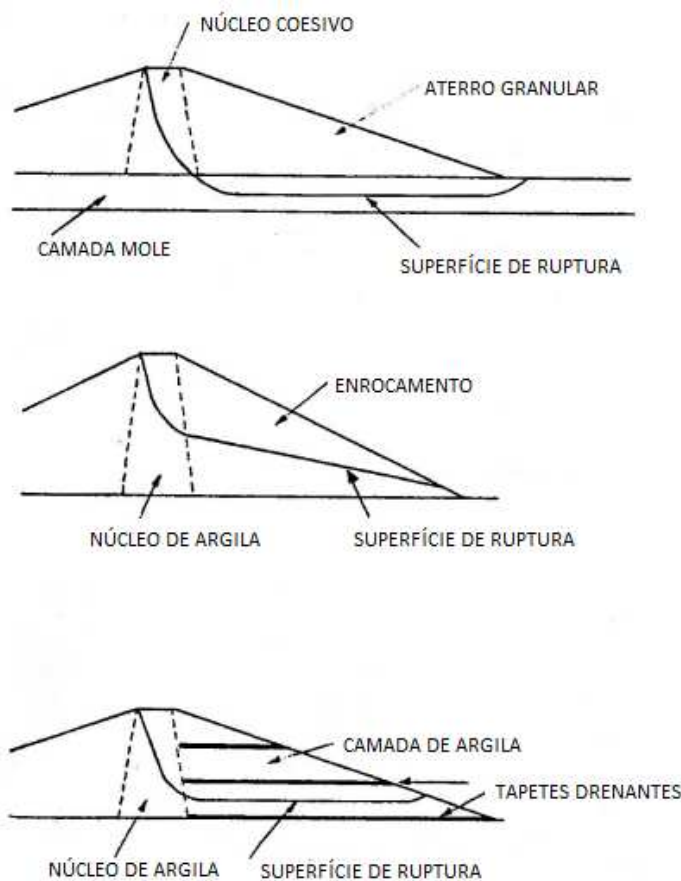


Figura 6: Condições que afetam a forma da superfície de ruptura.

Fonte: adaptado de Morgenstern e Price (1965).

Kutzner (1997) aponta que, durante a fase construtiva e a vida útil da barragem, as seguintes situações são críticas para a ocorrência de deslizamento de taludes:

- Condições temporárias do período construtivo do maciço, como a ocorrência de escavações ou de taludes que ainda serão modificados;
- Fim da construção do barramento, atuando apenas o peso próprio da estrutura. O adensamento do material ainda não foi concluído, e o enchimento do reservatório ainda não foi iniciado;
- Primeiro enchimento do reservatório;
- Condição de percolação estável, com o reservatório no nível máximo. O adensamento do corpo da barragem já foi concluído;
- Rebaixamento operacional do nível d'água no reservatório;
- Rebaixamento rápido do nível d'água no reservatório, devido a situações excepcionais.

2.1.5 Identificação de patologias em barragens de terra

De acordo com a ANA (2016), as patologias mais frequentes em pequenas barragens de terra, como o galgamento, a obstrução dos vertedouros e a erosão interna, podem ser identificadas a partir da detecção de anomalias no maciço da estrutura.

A insuficiência da borda livre pode facilitar a ocorrência do galgamento. A identificação de surgências de água no talude de jusante ou na região imediatamente à jusante deste, nas ombreiras, ou no contato do solo com estruturas rígidas podem indicar a ocorrência de percolação descontrolada através do corpo ou da fundação da barragem, enquanto a turvação da água nos filtros e drenos assinala o transporte de partículas sólidas. A presença de trincas transversais ou longitudinais no corpo da barragem indicam a ocorrência de movimentações na estrutura ou recalques diferenciais.

Além disso, a existência de vegetação de raízes profundas e de grandes dimensões pode gerar cavidades no interior do corpo da barragem, proporcionando caminhos preferenciais de percolação de água, capazes de produzir erosão interna e provocar a ocorrência de piping. As galerias e perfurações produzidas por animais de pequeno porte e insetos também podem ser perigosas, devido ao enfraquecimento que provocam no aterro e à facilidade de percolação da água nos seus vazios, produzindo fenômenos de erosão interna (ANA, 2016).

2.2 Investigações geofísicas

2.2.1 Definição e generalidades

As investigações geofísicas podem ser definidas como a execução e interpretação de medições das propriedades físicas da Terra, com o objetivo de se determinar as características da subsuperfície (SHERIFF, 2002, apud REYNOLDS, 2011).

Reynolds (2011) destaca que o estudo das propriedades físicas do subsolo pode ter diversas finalidades, como por exemplo: a determinação da espessura da crosta terrestre, a exploração de água subterrânea ou de minerais, a locação de redes

de dutos ou cabos subterrâneos e o mapeamento de elementos arqueológicos.

Entre as principais características dos métodos geofísicos que devem ser consideradas durante a interpretação dos dados, vale destacar que as grandezas físicas de interesse só podem ser corretamente interpretadas quando o sinal obtido nas medições for maior que os ruídos de fundo, como correntes parasitas, vibrações, entre outros. Além disso, possíveis ambiguidades podem surgir na interpretação dos dados obtidos, já que diferentes modelos geológicos podem se ajustar a esses dados, necessitando-se assim de um conhecimento prévio de informações geológicas e geotécnicas do local investigado (ABGE, 1998).

2.2.2 Tipos de investigações geofísicas

Kearey et al. (2009) fazem uma divisão geral dos métodos de investigação geofísica em dois tipos, os métodos de campos naturais e os de fontes artificiais.

Os métodos de campos naturais ou potenciais fazem uso dos campos naturais da Terra (gravitacional, magnético, elétrico e eletromagnético), procurando por perturbações localizadas que possam ser causadas por feições geológicas de interesse. Esses métodos permitem medir as propriedades da Terra em profundidades relativamente grandes, e são logisticamente mais simples de serem conduzidos.

Os métodos de fontes artificiais envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente, envolvendo a geração de campos elétricos ou eletromagnéticos locais que possam ser usados de forma análoga aos campos naturais, ou a geração de ondas sísmicas cuja velocidade de propagação na subsuperfície são medidas para fornecer informações acerca da distribuição dos limites geológicos em profundidade, entre outras informações. Esses métodos são capazes de produzir um resultado mais detalhado acerca da geologia na subsuperfície.

Os diferentes tipos de investigações geofísicas também podem ser classificados de acordo com o tipo de grandeza física que é medida em sua aplicação. A ABGE (1998) divide os principais métodos geofísicos utilizados na Engenharia em métodos sísmicos, potenciais e geoeletricos.

Os métodos sísmicos possuem como objetivo estudar a distribuição em profundidade da velocidade de propagação de ondas elásticas, propriedade que está

ligada às características físicas do meio geológico como densidade, constantes elásticas, porosidade, composição mineralógica, conteúdo de água, tensão confinante, entre outras. Sinais acústicos são emitidos na superfície e se propagam através das camadas geológicas, retornando à superfície ao sofrerem reflexão ou refração total nas interfaces entre diferentes extratos, sendo captados por sensores denominados geofones (em terra) ou hidrofones (em água). Após a captação dos dados recebidos pelos sensores, um sismógrafo os registra em forma digital ou os exibe na forma de sismogramas.

Os métodos potenciais são divididos em magnetometria e gravimetria.

A magnetometria detecta anomalias no campo magnético terrestre, que são consequência da magnetização diferenciada em subsuperfície. Constitui-se em um dos métodos geofísicos mais versáteis, pela facilidade, velocidade e baixo custo da execução dos ensaios e é aplicada principalmente em prospecção mineral.

A gravimetria tem por finalidade identificar contrastes de densidade em profundidade, e fundamenta-se na determinação da atração gravitacional em um ponto na superfície da Terra, utilizando equipamentos denominados gravímetros.

Os métodos geoeletricos envolvem a detecção em superfície dos efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica em subsuperfície. Esses métodos medem correntes elétricas, diferença de potencial e campos eletromagnéticos entre dois pontos na superfície, o que é possível devido aos contrastes entre as propriedades elétricas das rochas, sedimentos e minerais.

Um resumo dos parâmetros medidos e das propriedades físicas analisadas em cada método de investigação geofísica é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das características dos métodos geofísicos.

Fonte: adaptado de Kearey et al. (2009).

MÉTODO	PARÂMETRO MEDIDO	PROPRIEDADES FÍSICAS OPERATIVAS
Sísmico	Tempos de percurso de ondas sísmicas refletidas/refratadas	Densidade e módulos elásticos
Gravimétrico	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética e remanência
Resistividade	Resistência da Terra	Condutividade elétrica
Polarização induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependente da frequência	Capacitância elétrica
Potencial espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétricas
Radar	Tempos de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

Concluída a apresentação inicial dos diferentes métodos de investigação geofísica e suas generalidades, serão apresentados, nos próximos itens, os aspectos teóricos e executivos dos métodos que foram empregados neste trabalho.

2.2.3 Método da eletrorresistividade

2.2.3.1 Definições

Uma das principais propriedades analisadas nas investigações geoeletricas é a resistividade elétrica ou eletrorresistividade, que se relaciona com a dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio qualquer. A condução elétrica em sedimentos e rochas próximas à superfície é um mecanismo

basicamente iônico, ou seja, ocorre deslocamento de íons existentes na água contida nos poros interconectados. Os íons que conduzem a corrente são resultado da dissolução de sais (ABGE, 1998).

A resistividade é designada por (ρ), dada em ohm.m. Numericamente, a resistividade é igual à resistência medida entre os lados opostos de um cubo de dimensão unitária do material estudado (KEAREY et al., 2009). Entre os fatores que determinam a resistividade elétrica em solos e rochas se destaca a presença de água em seus poros ou fraturas, o que faz baixar o valor dessa propriedade, assim como a presença de minerais condutivos (FERNANDES, 1984, apud BORGES, 2002).

Raffek (2016) destaca que a resistividade do solo depende da integração das suas três fases (sólida, líquida e gasosa). A resistividade da fase líquida depende da sua concentração iônica, já a resistividade dos grãos depende das cargas elétricas presentes na superfície das partículas, enquanto o ar presente nos vazios atua como isolante.

Quando o ponto onde é medida a resistividade pertence a um meio anisotrópico, tanto a proporção quanto a orientação geométrica de cada material que constitui esse meio influenciam no valor obtido para a resistividade. Como exemplo, é possível citar o caso de estruturas laminares, onde o valor da resistividade varia se medido paralelamente ou perpendicularmente à direção das laminações (REYNOLDS, 2011). Telford et al. (1990) apontam que, no caso de meios heterogêneos, é medida a resistividade aparente do meio, que pode ser entendida como uma aproximação da resistividade real da região medida. Entretanto, o valor da resistividade aparente não representa um valor médio entre as resistividades dos materiais que compõem o meio estudado.

Os métodos para a medição de eletrorresistividade consistem em um arranjo de quatro eletrodos, sendo que dois deles (eletrodos A e B) são usados para enviar e receber uma corrente elétrica (I) ao solo, enquanto os outros dois (eletrodos M e N) são usados para medir a diferença de potencial (ΔV) entre eles. A resistividade aparente é dada por (BORGES, 2002):

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde o fator geométrico k é função das distâncias entre os eletrodos A, B, M e N, e é calculado pela seguinte expressão:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

2.2.3.2 Técnicas de levantamento de dados

As medições de resistividade elétrica podem gerar modelos em uma, duas ou três dimensões.

Para a geração de modelos 1D, são executadas sondagens elétricas verticais (SEVs), que são geralmente aplicadas quando se deseja uma informação pontual, com observação da variação vertical da resistividade (BORGES, 2002).

Para a geração de modelos 2D, são executadas sondagens elétricas verticais multi eletrodos (SEVMEs), também chamadas de caminhamentos elétricos, que são utilizadas quando se deseja fazer um estudo da variação lateral da resistividade em vários níveis de profundidade. Tanto para as SEVs quanto para as SEVMEs, os arranjos de eletrodos mais utilizados são o de Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Polo e Wenner (BORGES, 2002).

Para a geração de modelos 3D, os eletrodos são dispostos em uma malha quadrada ou retangular, com espaçamento regular nas direções x e y (GANDOLFO e GALLAS, 2005).

A Figura 7 mostra um exemplo da distribuição dos pontos coletados para a construção de uma pseudo-seção 2D de eletrorresistividade, onde o valor de “N” indica os diferentes níveis de profundidade estudados.

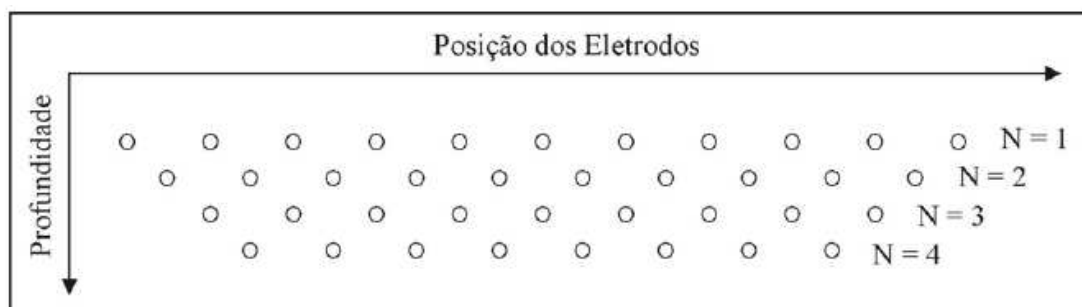


Figura 7: Distribuição dos pontos coletados para a construção de uma pseudo-seção 2D de eletrorresistividade.

Fonte: Borges (2002).

2.2.3.3 Arranjos de eletrodos

Diversas configurações geométricas dos eletrodos, denominadas arranjos, podem ser utilizadas para a determinação da eletrorresistividade. Gandolfo (2007) destaca que a escolha do arranjo a ser utilizado em cada investigação depende de uma série de fatores, como o tipo de alvo a ser mapeado, a razão sinal/ruído e a profundidade de investigação. Os principais arranjos aplicados nos meios acadêmico e profissional passam a ser apresentados a seguir.

No arranjo de Schlumberger, cujo esquema é apresentado na Figura 8, os quatro eletrodos são dispostos em linha, sendo os eletrodos de potencial (M e N) colocados entre os de corrente (A e B) e distribuídos simetricamente em relação a um ponto central, com a condição de que a distância MN deve ser menor que $AB/2$ (BORGES, 2002).

Esse arranjo é geralmente aplicado na execução de SEVs (BORGES, 2002). Além disso, apresenta boa resolução vertical, sendo indicado para identificar estruturas dispostas horizontalmente, sendo menos eficiente para estruturas subverticais (GANDOLFO, 2007).

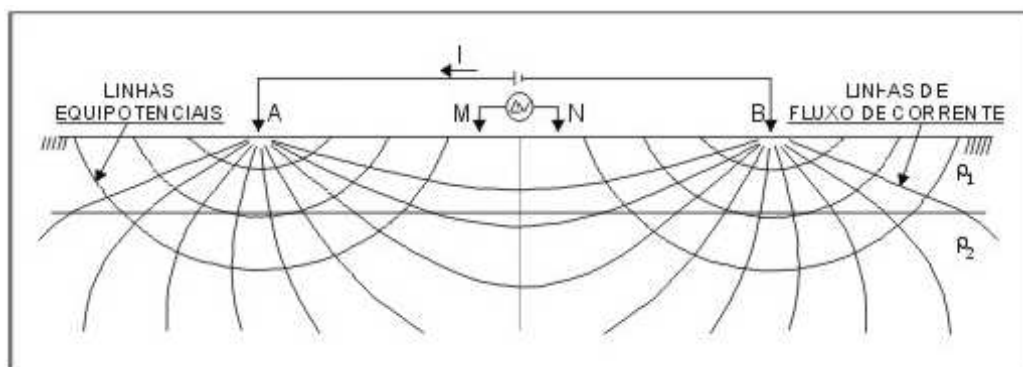


Figura 8: Esquema do arranjo de Schlumberger.

Fonte: Telford et al (1990), apud Borges (2002).

No arranjo Wenner, apresentado na Figura 9, os quatro eletrodos (de corrente e de potencial) são espaçados entre si de uma mesma distância (a). A profundidade de investigação aumenta conforme esse espaçamento é aumentado em torno de um ponto central fixo (KEAREY et. al., 2009).

Esse arranjo apresenta elevada razão sinal/ruído, e fornece uma boa resolução vertical, sendo eficiente no mapeamento de estruturas horizontais (GANDOLFO, 2007).

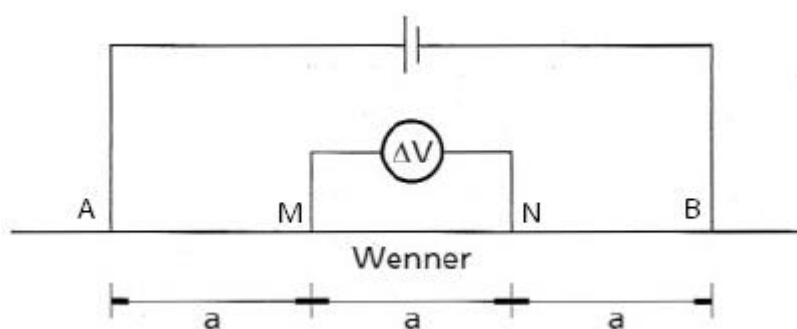


Figura 9: Esquema do arranjo Wenner.

Fonte: Kearey et. al. (2009).

No arranjo dipolo-dipolo, apresentado na Figura 10, os eletrodos AB e MN são dispostos segundo uma linha e o arranjo é definido pelos espaçamentos entre os eletrodos (X), sendo que $X = AB = MN$. A profundidade de investigação cresce com a distância entre os eletrodos de potencial e os de corrente (R) e, teoricamente, corresponde a $R/2$. O ponto investigado é a intersecção entre uma linha que parte do

centro do arranjo de eletrodos AB e outra que parte do centro do arranjo MN, com ângulos de 45 graus. A cada medida, os dipolos são deslocados de uma distância igual a X e os dados são novamente obtidos em diversas profundidades (BORGES, 2002).

Esse arranjo é usualmente aplicado na execução de SEVMEs (BORGES, 2002), sendo também utilizado em aquisições tridimensionais (GANDOLFO e GALLAS, 2005). Apresenta boa resolução horizontal, apresentando bom desempenho no mapeamento de estruturas verticais, sendo menos eficiente para a identificação de estruturas horizontais. As principais desvantagens desse arranjo são a redução da razão sinal/ruído conforme aumenta a separação entre os dipolos, além da identificação de anomalias ser fortemente influenciada por irregularidades na cobertura superficial (GANDOLFO, 2007).

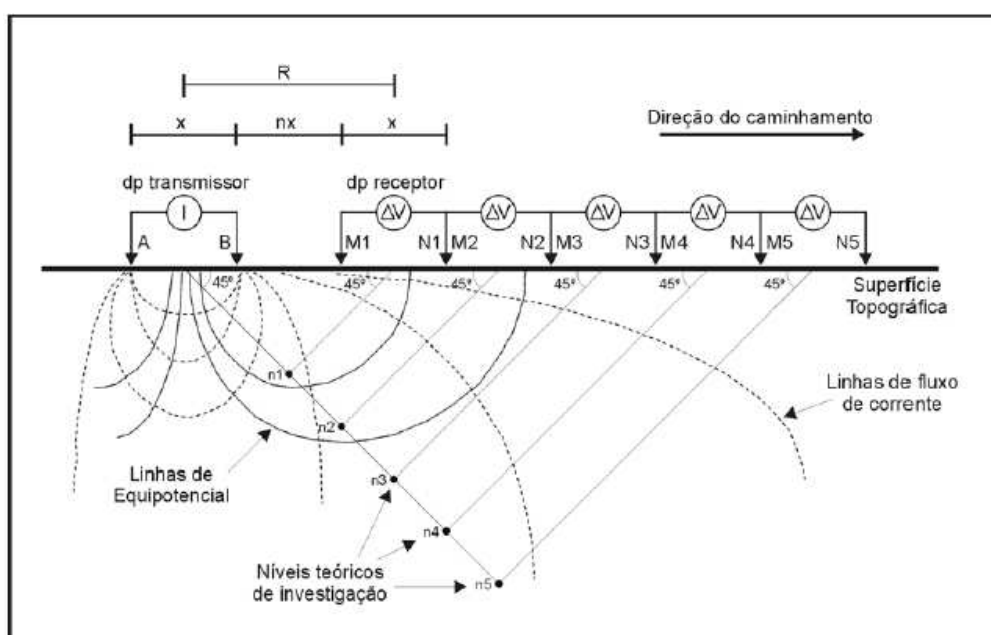


Figura 10: Esquema do arranjo dipolo-dipolo.

Fonte: Borges (2002).

No arranjo Polo-Polo, apresentado na Figura 11, um dos eletrodos de corrente (A) e um dos eletrodos de potencial (M) são colocados ao longo do perfil investigado, enquanto os outros eletrodos são colocados em distâncias muito grandes do perfil, simulando distâncias infinitas, garantindo-se que eles não tenham influência sobre o resto do arranjo (NOGUEIRA, 2014).

A sequência das medidas é feita aumentando-se a distância entre os eletrodos A e M (na) na linha de levantamento, sendo que a profundidade de investigação aumenta à medida que a distância AM aumenta (GANDOLFO, 2007).

Esse é o arranjo que apresenta melhor desempenho em termos de profundidade de investigação, apresentando, entretanto, baixa resolução (GANDOLFO, 2007). É geralmente utilizado em aquisições tridimensionais, pois fornece o maior número possível de medidas, além de apresentar uma perda de dados muito pequena nas bordas e apresentar elevada razão sinal/ruído (GANDOLFO e GALLAS, 2005).

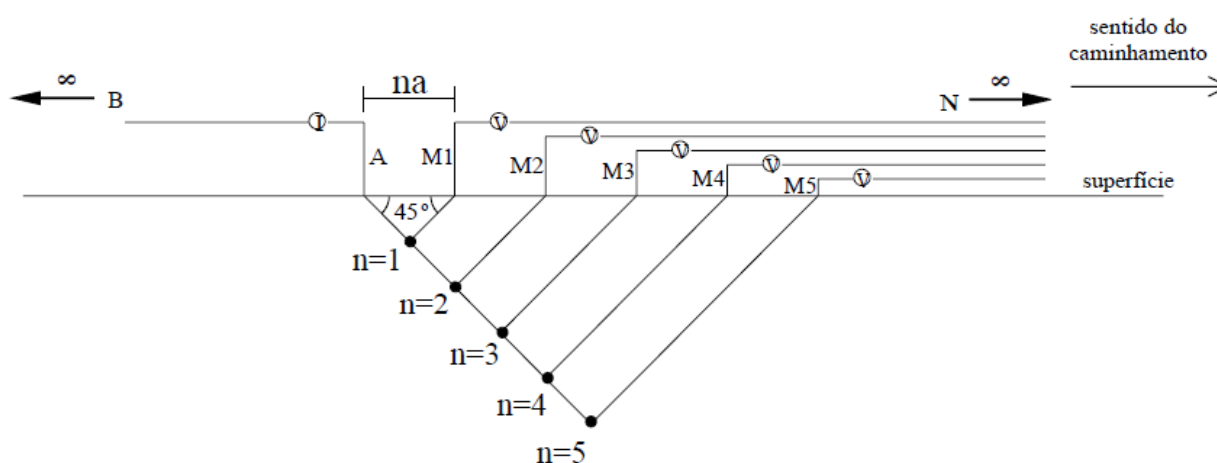


Figura 11: Esquema do arranjo Polo-Polo.

Fonte: Gandolfo (2007).

No arranjo Gradiente, apresentado na Figura 12, os eletrodos de corrente (A e B) são mantidos fixos nos dois extremos do arranjo, enquanto os eletrodos de potencial (M e N) são deslocados ao longo de perfis paralelos à linha AB (GALLAS et al., 2001, apud PEREIRA, 2019).

Esse arranjo apresenta ótimo desempenho em termos de resolução lateral, sendo indicado para a identificação de estruturas verticais ou subverticais (GANDOLFO, 2007).

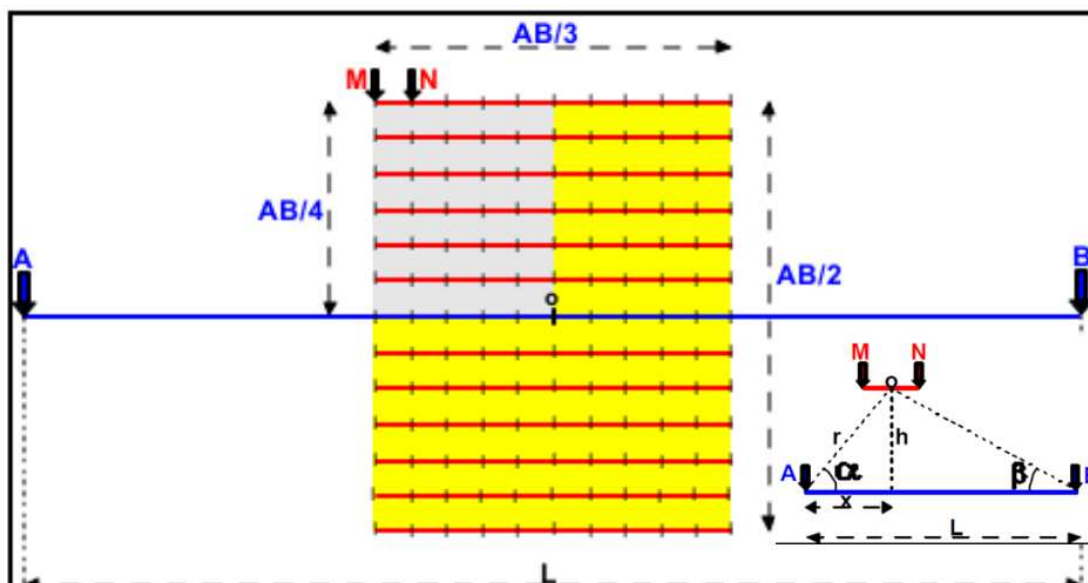


Figura 12: Esquema do arranjo Gradiente.

Fonte: Braga (2007), apud Pereira (2019).

2.2.4 Método do potencial espontâneo (SP)

2.2.4.1 Definições

O método do potencial espontâneo é um método de campo natural e baseia-se no fato de que, na ausência de um campo elétrico artificial, é possível medir uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno.

Trata-se de um método de execução extremamente simples, já que para se realizar um levantamento SP são necessários basicamente dois eletrodos, um voltímetro e fios devidamente isolados para as conexões entre os eletrodos e o voltímetro (GALLAS, 2005).

O potencial espontâneo (SP) é causado por atividade eletroquímica ou mecânica, sendo que a água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP. Os potenciais podem estar associados à presença de corpos metálicos, contatos entre rochas de diferentes propriedades elétricas, atividade bioelétrica de materiais orgânicos, corrosão e a gradientes térmicos ou de pressão nos fluidos em subsuperfície.

2.2.4.2 Geração de anomalias de potencial espontâneo

No caso do estudo do fluxo de água em subsuperfície, as anomalias SP são geradas pelo fluxo de fluidos, de calor ou de íons, sendo útil para localizar e delinear o fluxo e as fontes associadas a esses processos.

O potencial de fluxo ocorre devido ao movimento de fluidos através dos poros e descontinuidades do solo, fenômeno também chamado de eletrofiltração ou eletrocinese (GALLAS, 2005). Considerando-se a estrutura porosa do solo como uma rede de capilares por onde percola a água, seu comportamento pode ser visto como uma membrana porosa. Os ânions são absorvidos pelas paredes dos capilares e atraem os cátions, estabelecendo-se desta maneira uma dupla camada elétrica. Durante o fluxo os ânions permanecem fixos, enquanto os cátions são transportados através dos capilares, criando uma maior concentração de cátions na região final do fluxo.

Surge então uma diferença de potencial entre o ponto inicial e final do fluxo, que obedece à equação de Helmholtz:

$$\Delta V = \frac{\zeta \varepsilon P}{\eta \sigma} \quad (3)$$

Onde:

- ζ : diferença de potencial na dupla camada;
- ε : constante dielétrica;
- σ : condutividade;
- η : viscosidade do eletrólito;
- P : diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar

A Figura 13 ilustra uma anomalia SP devido à infiltração da água da chuva em um terreno. Os cátions são removidos pela água e, nos locais topograficamente mais elevados, surgem núcleos eletricamente negativos.

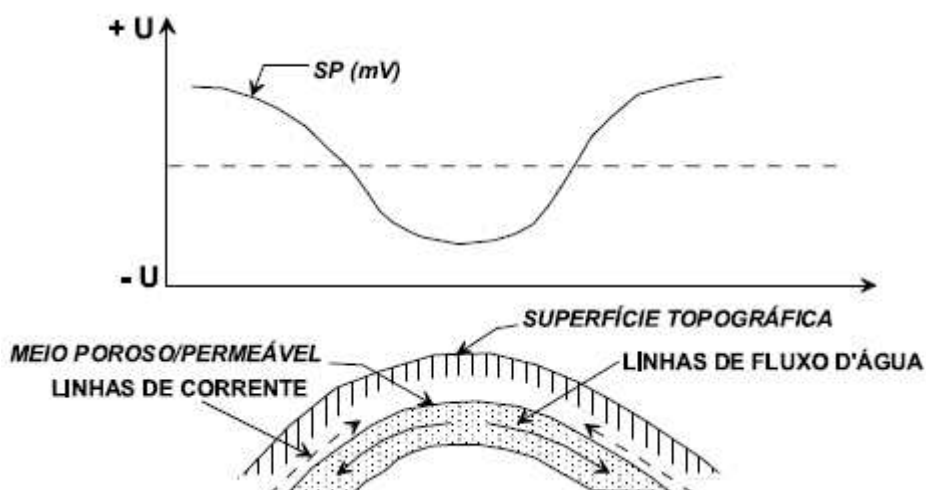


Figura 13: Esquema de uma anomalia SP devido à percolação de água.

Fonte: Gallas (2005).

Diversas estruturas enterradas também podem gerar anomalias de potencial espontâneo que podem ser detectadas. O trabalho de Drahor (2004) mostra diversos exemplos da associação de anomalias positivas e negativas de SP com a identificação de estruturas arqueológicas enterradas, enquanto Corwin (1990) destaca que estruturas como tubulações metálicas subterrâneas e revestimentos de poços verticais podem gerar anomalias negativas com amplitude considerável, como mostrado na Figura 14.

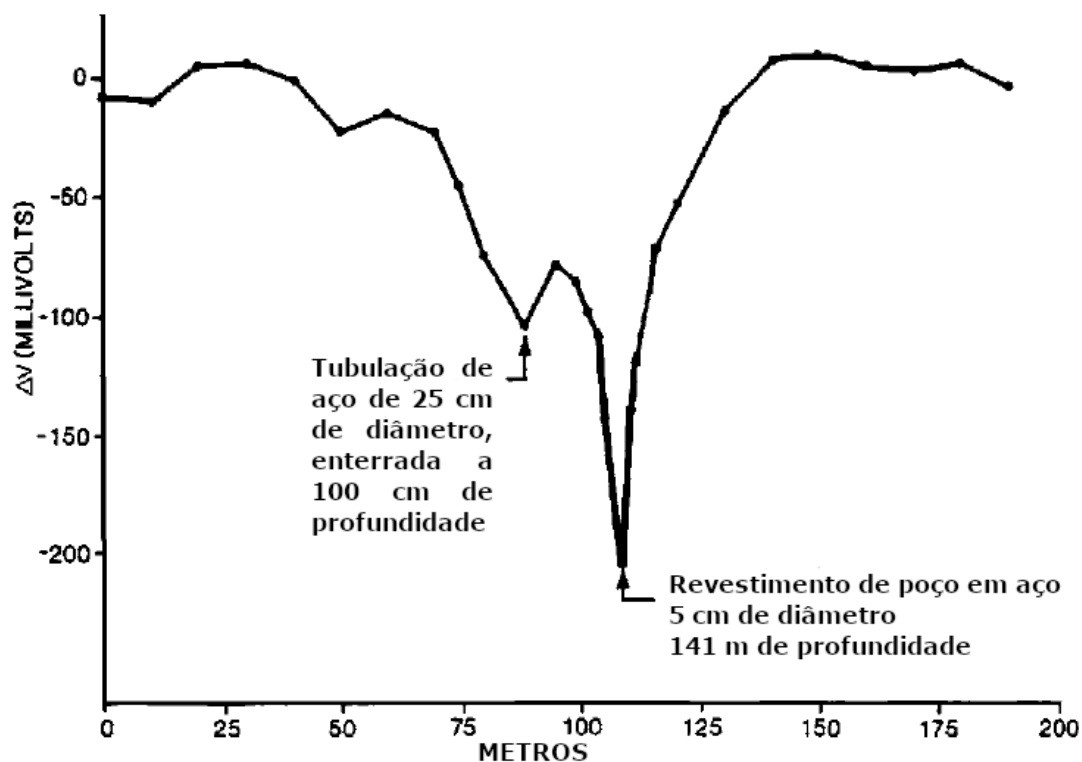


Figura 14: Anomalias negativas de SP geradas por estruturas subterrâneas.

Fonte: Adaptada de Corwin (1990).

Uma estimativa da localização de objetos em subsuperfície que atuam como fontes de anomalias de potencial espontâneo pode ser feita através da análise das curvas potencial x posição obtidas na aquisição dos dados, em conjunto com a utilização de ábacos que dependem da geometria do objeto. Como exemplos da aplicação dessa técnica, destacam-se as metodologias desenvolvidas por Babu e Rao (1988) para objetos em forma de placa, Murty e Haricharan (1985) para objetos em forma de placa e cilíndricos, e por Bhattacharya e Roy (1981) para objetos esféricos e cilíndricos.

2.2.4.3 Técnicas de aquisição de dados

As técnicas mais utilizadas para a aquisição de dados no método SP são a técnica dos gradientes e a técnica dos potenciais (GALLAS, 2005).

A técnica dos gradientes consiste em medir sucessivamente as diferenças de potencial entre dois pontos contíguos de um perfil, deslocando o arranjo após tomada

a medida entre esses pontos, normalmente em intervalos regulares e iguais. A maior vantagem desta configuração é o uso de fios curtos, de fácil e rápido deslocamento, além de minimizar efeitos indutivos que podem ocorrer com o emprego de cabos muito longos.

Na técnica dos potenciais um dos eletrodos é mantido fixo em uma estação-base, enquanto o outro percorre os pontos de medidas nos perfis ou malha de levantamento. A qualidade dos dados obtidos com esta técnica geralmente é melhor do que na anterior e a possibilidade de serem mapeadas anomalias causadas por ruídos é menor.

As Figuras 15 e 16 mostram esquemas da medição de potencial espontâneo pelas técnicas dos gradientes e dos potenciais, respectivamente.

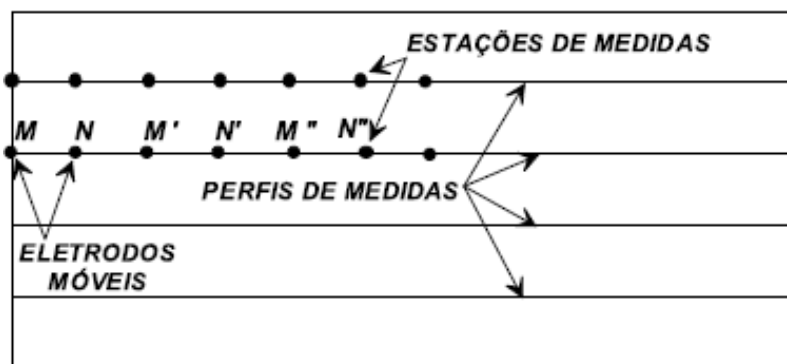


Figura 15: Esquema da técnica dos gradientes.

Fonte: Gallas (2005).

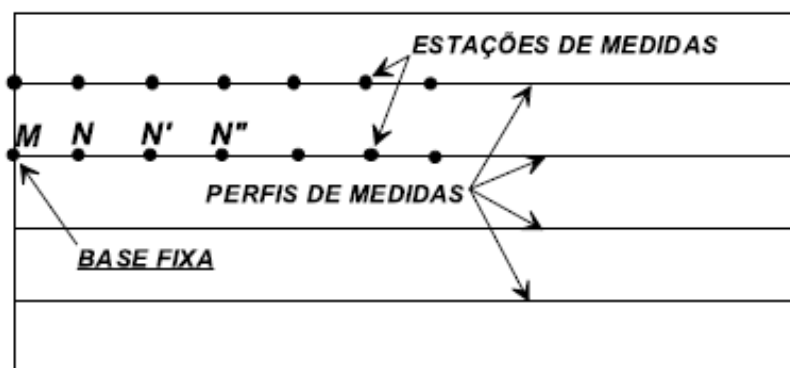


Figura 16: Esquema da técnica dos potenciais.

Fonte: Gallas (2005).

2.2.5 Radar de penetração no solo (GPR)

2.2.5.1 Definições

O método GPR consiste na emissão na subsuperfície de ondas eletromagnéticas (EM) de alta frequência, na ordem de 10 a 2500 MHz. A frequência do sinal emitido determina a resolução e a penetração atingidas, sendo que frequências maiores (200 a 2500 MHz) possibilitam uma maior resolução, enquanto frequências menores (10 a 200 MHz) possibilitam uma penetração mais profunda do sinal (ABGE, 1998).

As ondas eletromagnéticas são irradiadas na subsuperfície por uma antena transmissora, e ao atingir uma interface entre dois meios com propriedades elétricas distintas, essas ondas podem refletir, refratar ou difratar. As ondas refletidas retornam à superfície e são captadas por uma antena receptora, sendo gravados o tempo duplo de viagem e a intensidade do sinal (TEIXEIRA, 2013).

Para rochas e materiais não magnéticos, Kearey et al. (2009) indicam que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície é dada por:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (4)$$

Sendo c é a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 0,3 m/ns) e K é a constante dielétrica do meio de propagação.

O registro do sinal de GPR é feito em função da intensidade do sinal, que deve ser maior que um limite mínimo definido pelo operador. Nesse processo é gerado um traço no qual pixels mais extensos ou com cores mais intensas representam regiões de maior amplitude de sinal (REYNOLDS, 2011). Um exemplo é mostrado na Figura 17, onde é apresentada a forma da onda eletromagnética captada e o traço correspondente.

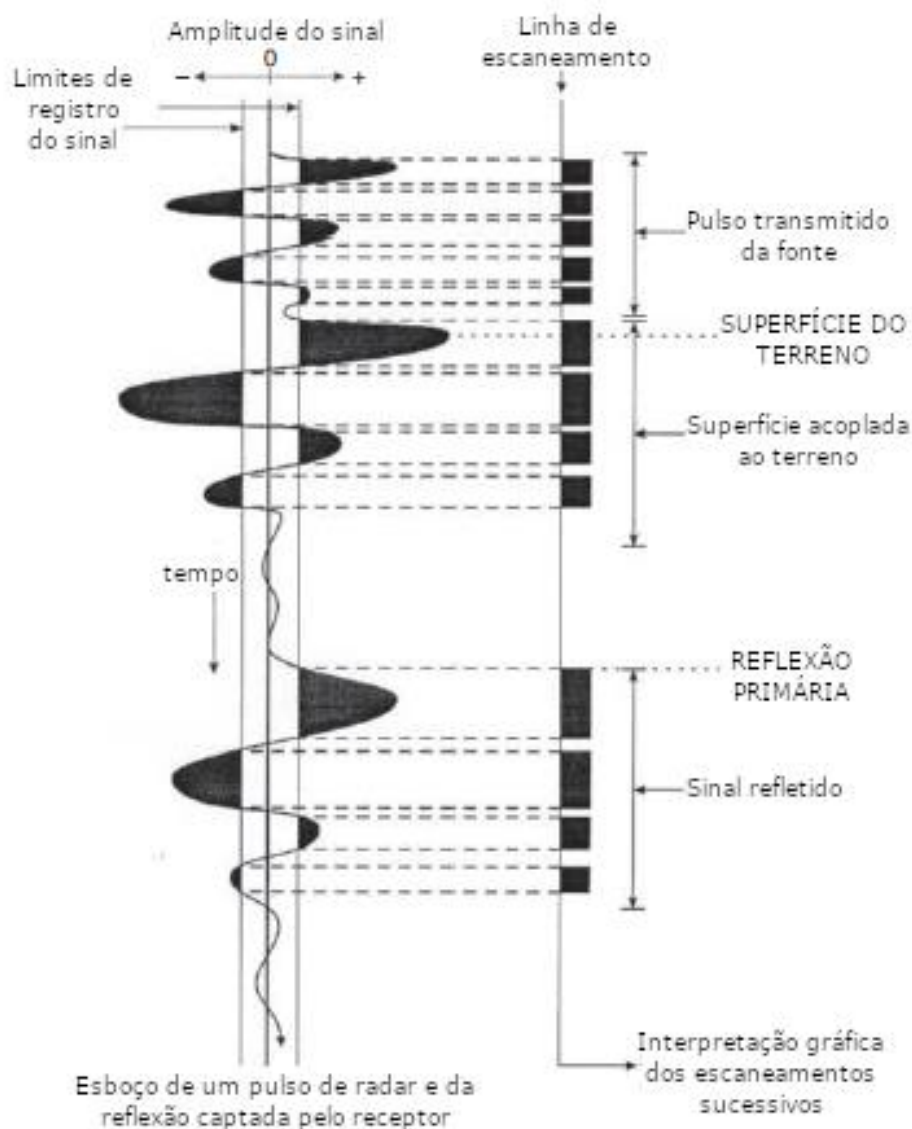


Figura 17: Exemplo de geração do traço de uma onda eletromagnética captada.

Fonte: Adaptado de Reynolds (2011).

2.2.5.2 Técnicas de aquisição de dados

A principal técnica de aquisição de dados no método GPR são os perfis de reflexão com afastamento constante. Nessa técnica, a distância entre as antenas transmissora e receptora é mantida constante, e as duas são transportadas, passo a passo, ao longo do perfil. É determinado então, em cada passo, o tempo duplo do sinal emitido (tempo de ida e volta) mostrando as variações das propriedades dielétricas na subsuperfície (BORGES, 2002). A Figura 18 apresenta um esquema dessa técnica.

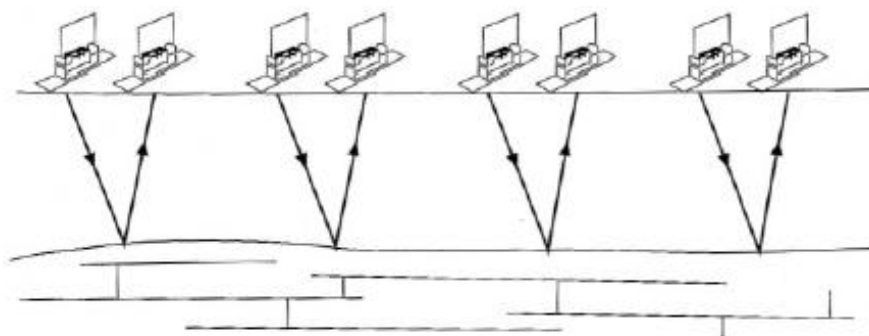


Figura 18: Esquema da técnica dos perfis de reflexão com afastamento constante.

Fonte: Kearey et. al. (2009).

A principal forma de se determinar a velocidade das ondas eletromagnéticas no meio investigado é a execução de sondagens de velocidade. As formas mais utilizadas de sondagem de velocidade são as técnicas CMP (Common Mid Point) e WARR (Wide Angle Reflection and Refraction). Em ambas as técnicas o espaçamento entre as antenas de emissão e recepção do sinal é variável. Na técnica CMP, a abertura entre as antenas é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central. Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (BORGES, 2002). As Figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, um esquema das técnicas CMP e WARR.

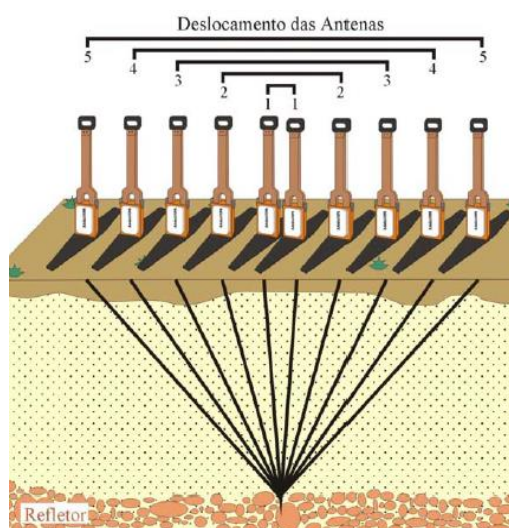


Figura 19: Esquema da técnica CMP.

Fonte: Borges (2002).

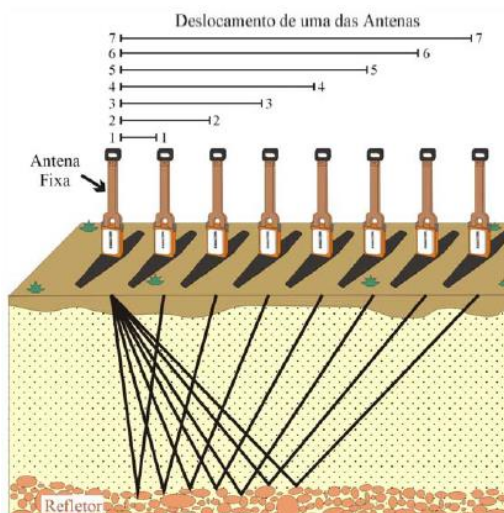


Figura 20: Esquema da técnica WARR.

Fonte: Borges (2002).

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas também pode ser estimada após o registro e processamento do sinal de GPR através da técnica de ajuste de hipérboles, que só pode ser executado através do uso de softwares apropriados. Nessa técnica hipérboles são ajustadas de forma manual ou automática ao sinal obtido no radargrama, permitindo uma estimativa das propriedades do meio e o posicionamento (profundidade e tamanho) do objeto referente à hipérbole gerada (DOU et al., 2017). Um exemplo desse processo é mostrado na Figura 21.

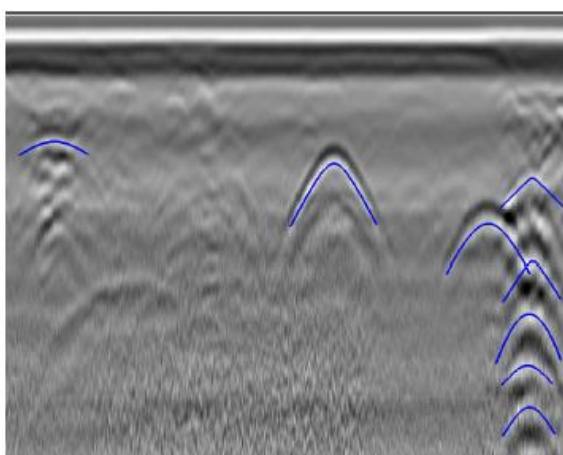


Figura 21: Exemplo do processo de ajuste de hipérboles em radargramas.

Fonte: Dou et al. (2017).

2.3 Investigações geofísicas aplicadas em barragens de terra

A utilização de métodos geofísicos no monitoramento de barragens de terra é uma prática relativamente recente, que surgiu a partir da necessidade de se complementar a investigação e a instrumentação tradicionalmente empregadas.

Assim, trabalhos recentes vêm destacando a aplicação de investigações geofísicas em barragens de terra, com os diferentes métodos geofísicos se adequando a diferentes finalidades.

Teixeira (2013) utilizou levantamentos de resistividade elétrica e GPR para delimitar os contatos entre os diferentes materiais que compõem o maciço e a fundação do dique de Sant Llorenç de Montgai (Espanha). Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 22 e 23, respectivamente. Ambos os resultados correspondem à mesma seção investigada, sendo que o levantamento de resistividade abrange as posições de 0 m a 705 m, enquanto o levantamento de GPR abrange as posições de 50 m a 600 m.

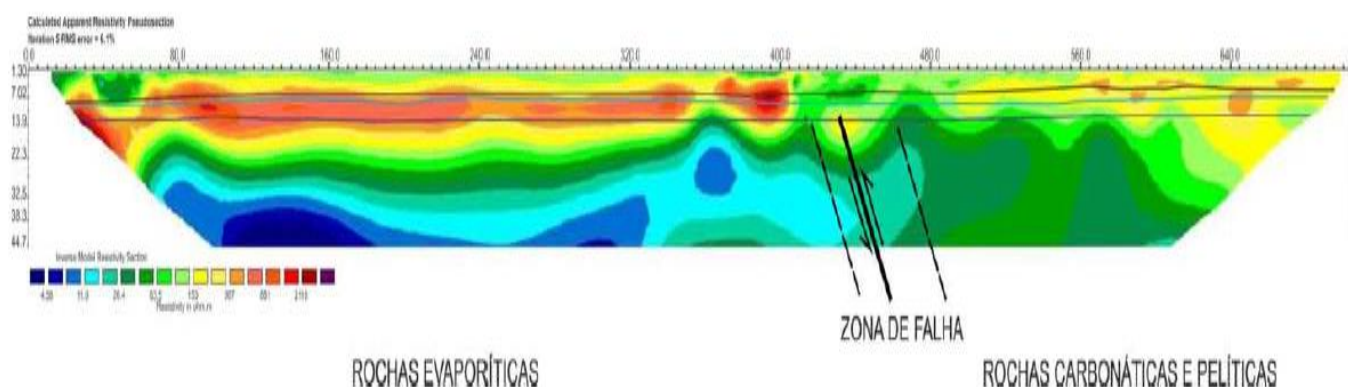


Figura 22: Perfil geoeletrico evidenciando os contatos entre diferentes materiais no dique de Sant Llorenç de Montgai.

Fonte: Teixeira (2013).

No levantamento de resistividade foram identificadas três camadas geoeletricas, cujos contatos são delimitados pelas superfícies destacadas na Figura 23. A primeira camada (mais superficial) corresponde ao corpo do dique, a segunda camada (intermediária) representa uma mistura de solo e aluvião, sobre a qual o dique está assentado, enquanto a terceira camada (mais profunda) é constituída por dois tipos distintos de rochas sedimentares, que são separadas por uma zona de falha que foi identificada em investigações diretas realizadas anteriormente no local estudado.

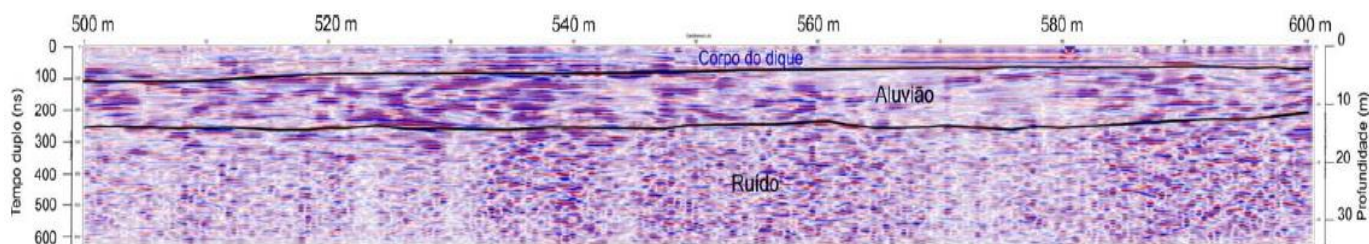


Figura 23: Perfil de GPR evidenciando os contatos entre diferentes materiais no dique de Sant Llorenç de Montgai.

Fonte: Teixeira (2013).

No levantamento de GPR, foi possível delimitar o contato entre o corpo do dique e a camada inferior de aluvião, indicado pela linha escura na imagem, utilizando-se uma antena de 50 MHz. Pelos resultados constatou-se que o contato entre as camadas é aproximadamente horizontal.

Coura (2019) utilizou levantamentos de resistividade elétrica para avaliar as condições de estabilidade de uma barragem de pequeno porte no município de Cordeirópolis (SP). As feições geológicas encontradas foram separadas em zonas de alta resistividade (ZAR) e zonas de baixa resistividade (ZBR). Os resultados são apresentados na Figura 24.

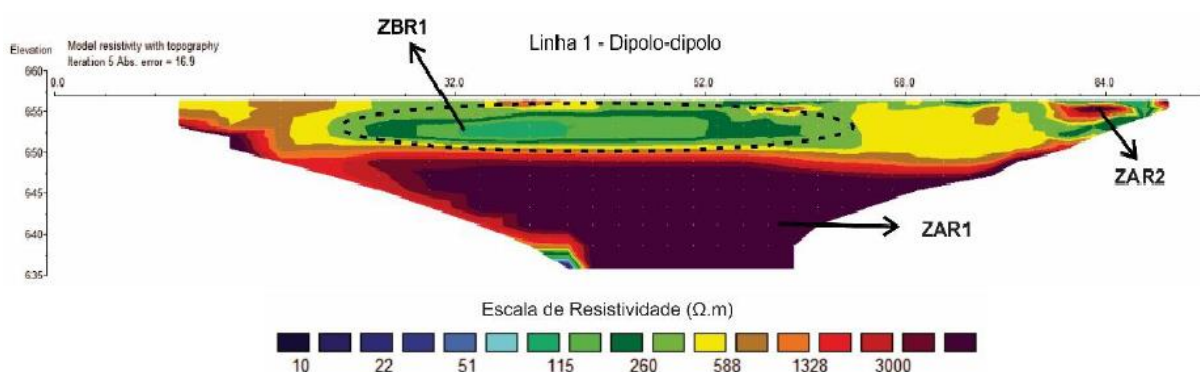


Figura 24: Seção de eletrorresistividade obtida na barragem de Cordeirópolis.

Fonte: Adaptado de Coura (2019).

A partir da seção de eletrorresistividade gerada, foi possível identificar o substrato rochoso da área de estudo, identificado como ZAR1 na imagem, assim como

a presença de uma vala escavada no corpo da barragem contendo blocos e matacões de basalto no seu interior (ZAR2). Além disso foi identificada uma zona de saturação no corpo da barragem, com possível infiltração de água (ZBR1).

Nesta mesma barragem foi executado um levantamento de potencial espontâneo por Netto et al. (2020), com o objetivo de se avaliar as suas condições de fluxo. A distribuição dos valores de potencial ao longo da área estudada é mostrada na Figura 25, sendo destacadas três anomalias de SP.

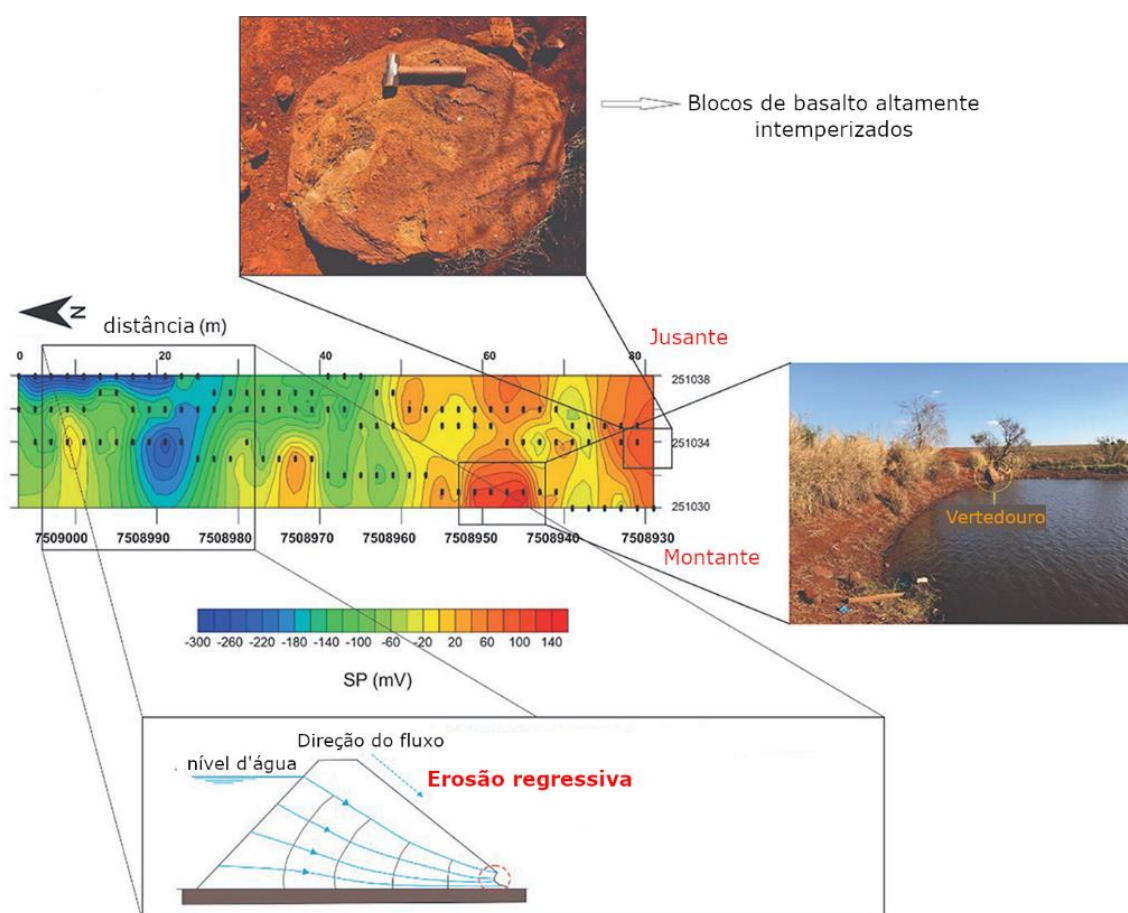


Figura 25: Resultado do levantamento de SP realizado na barragem de Cordeirópolis.

Fonte: Adaptado de Netto et al. (2020).

Foram identificadas duas anomalias positivas distintas de SP, que foram associadas à presença de blocos de basalto altamente resistentes entre as posições 74 e 76 metros e à presença de um vertedouro de concreto entre as posições 58 e 60 metros, que se encontrava seco à época da aquisição dos dados.

A anomalia negativa destacada, com valores mais negativos à jusante e um

aumento do valor do potencial em direção à montante, foi atribuída à ocorrência de um processo de erosão interna regressiva (piping) na região correspondente a essa anomalia. Reynolds (2011) correlaciona essa configuração de SP com a ocorrência de um processo mais intenso de carreamento de cátions nas regiões de concentração de fluxo. Esse processo é ilustrado na Figura 26.

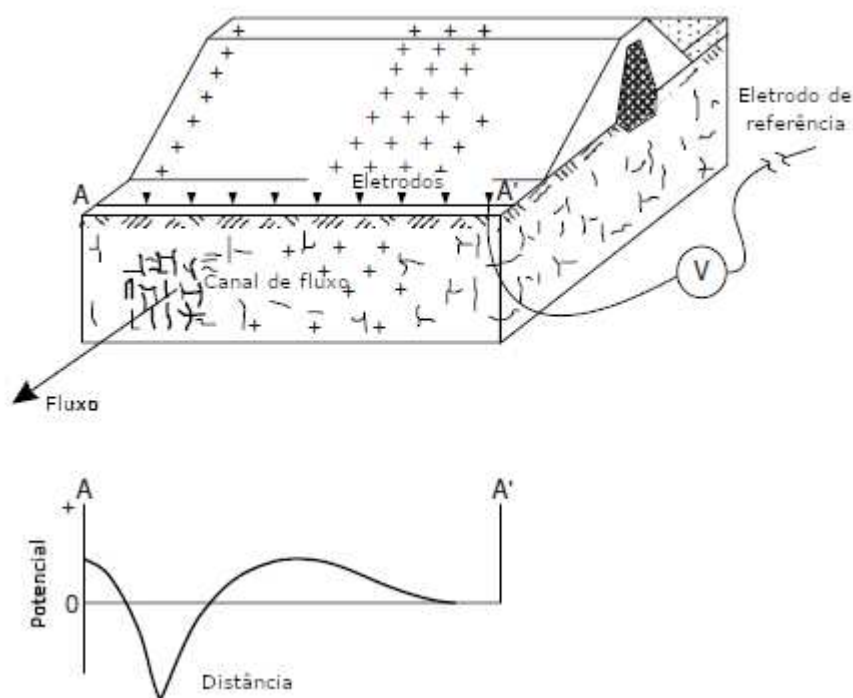


Figura 26: Geração de anomalias negativas de potencial espontâneo em zonas de fluxo concentrado em barragens de terra.

Fonte: Adaptado de Reynolds (2011).

Kim et al. (2007), apud Reynolds (2011), relatam a utilização de levantamentos de GPR para avaliar as condições de estabilidade de uma barragem de terra na Coréia do Sul, onde foi feita uma investigação utilizando-se uma antena de 50MHz na crista da barragem. Os resultados são mostrados na Figura 27, onde as setas indicam a presença de pulsos de ondas EM que representam indicativos da presença de cavidades no corpo da barragem, próximas à superfície. Nota-se que esses pulsos se caracterizam por possuir grande amplitude e apresentarem grande extensão em profundidade e pouca extensão lateral.

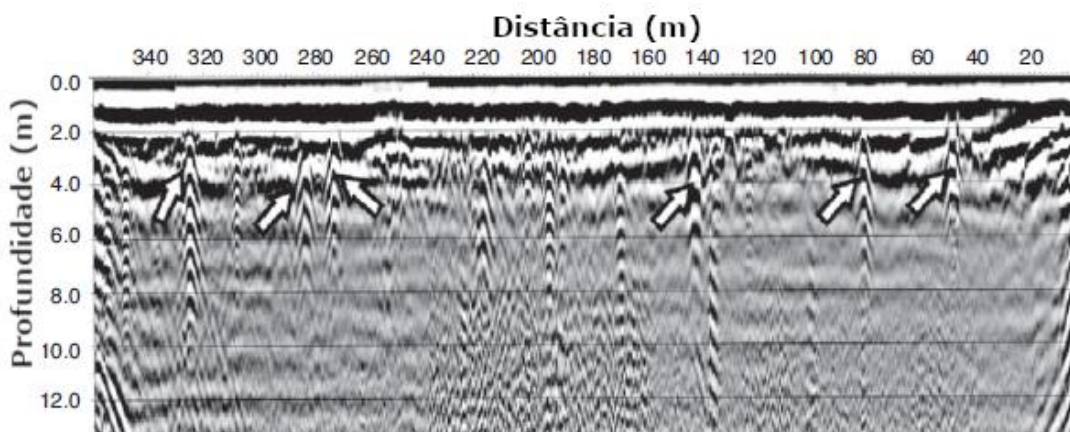


Figura 27: Seção de GPR evidenciando a presença de cavidades próximas à superfície.

Fonte: Adaptado de Kim et al. (2007), apud Reynolds (2011).

2.4 Correlação entre dados geofísicos e parâmetros geotécnicos

Apesar da aquisição de parâmetros geotécnicos dos solos investigados por meio de métodos diretos ser relativamente mais cara e mais lenta quando comparada com a aquisição feita por métodos geofísicos, a utilização dos métodos diretos se apresenta como um meio muito eficaz e imprescindível para calibrar, facilitar e integrar a interpretação das informações obtidas a partir da aplicação dos métodos geofísicos.

Uma das principais vantagens da integração dos resultados das investigações geofísicas com dados de investigações convencionais é a eliminação das ambiguidades que podem surgir na interpretação dos seus resultados, já que os dados diretos indicam qual é o modelo geológico/geotécnico do local investigado que se adequa corretamente aos resultados obtidos indiretamente.

Além disso, podem ser criados modelos de correlação entre os dados geofísicos e parâmetros geotécnicos para os locais investigados. Esse procedimento permite uma maior compreensão das características e possíveis comportamentos das estruturas geotécnicas investigadas, tanto qualitativa quanto quantitativamente. Assim, pode ser obtida uma economia de tempo e de recursos humanos e econômicos no monitoramento de tais estruturas ao longo do tempo.

A seguir são mostrados exemplos de correlações entre dados geofísicos e parâmetros geotécnicos com diferentes finalidades.

Oh e Sun (2008) avaliaram a correlação entre o valor da resistividade aparente

e o número de golpes (N) do ensaio SPT para o solo do núcleo de uma barragem de terra, caracterizado como uma argila arenosa. Foi obtida uma boa correlação entre esses parâmetros, indicando uma tendência de aumento da rigidez do solo (aumento do valor de N) com o aumento da resistividade.

Além disso, essa comparação permitiu a identificação de zonas onde o material do corpo da barragem estava danificado, seja devido a uma compactação ruim ou ao processo de carreamento de partículas finas, o que é caracterizado por zonas com alto valor de resistividade e baixos valores de N. Também foi identificada uma zona com baixa resistividade e alto valor de N, o que é atribuído ao material saturado do filtro da barragem ou a uma camada de enrocamento.

Os resultados são mostrados na Figura 28, onde a região circulada superior indica a região cujo material está danificado, enquanto a zona circulada inferior indica a zona de material rochoso. Na legenda do gráfico, as siglas “BH-1”, “BH-a” e “BH-3” representam três diferentes furos que foram realizados na crista da barragem para obtenção dos dados.

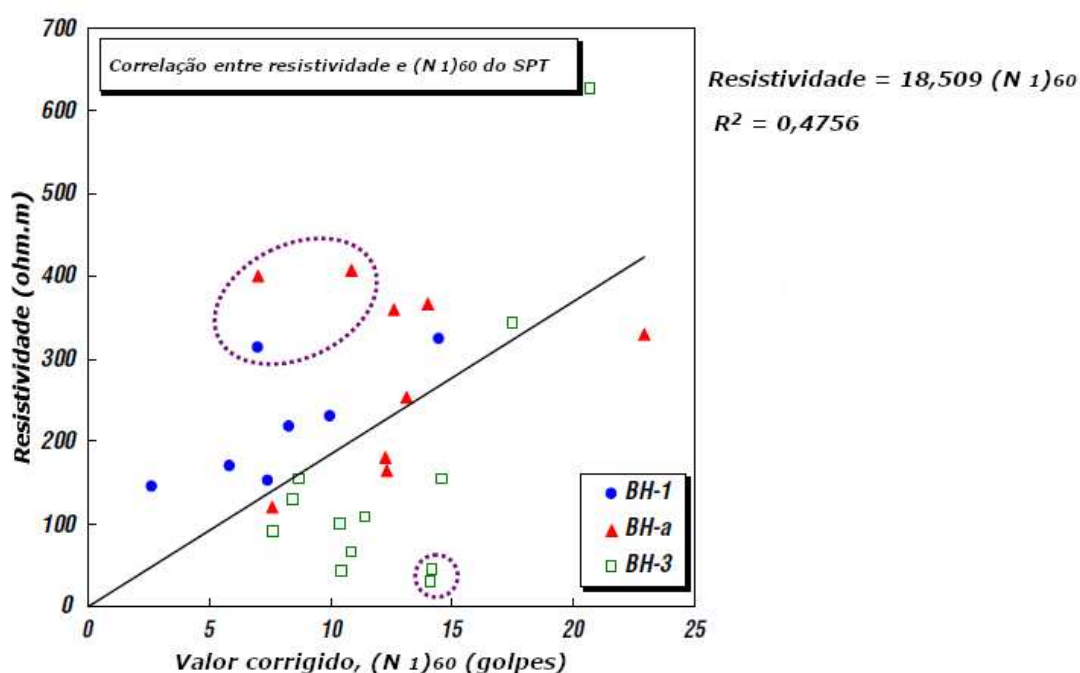


Figura 28: Correlação entre a resistividade e o valor de N para uma argila arenosa.

Fonte: Adaptado de Oh e Sun (2008).

Hatta e Osman (2015) encontraram uma boa correlação linear entre o valor da

resistividade aparente obtida por meio do levantamento de dados por SEVs e o número de golpes (N) obtidos a partir do ensaio SPT, para solos arenosos. Os resultados são mostrados na Figura 29.

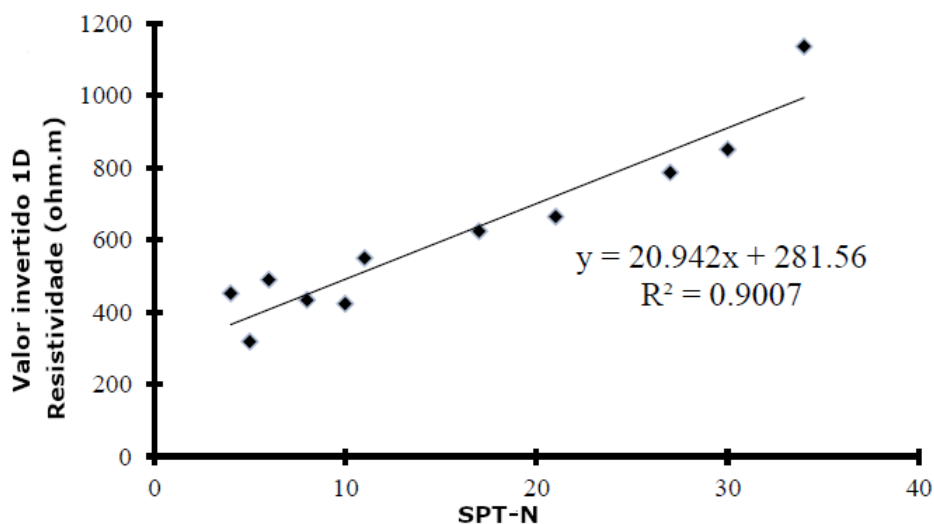


Figura 29: Correlação entre o valor N e a resistividade elétrica.

Fonte: Adaptado de Hatta e Osman (2015).

Foi também obtida uma correlação não linear entre a resistividade e o teor de umidade dos solos analisados. Os resultados são mostrados na Figura 30.

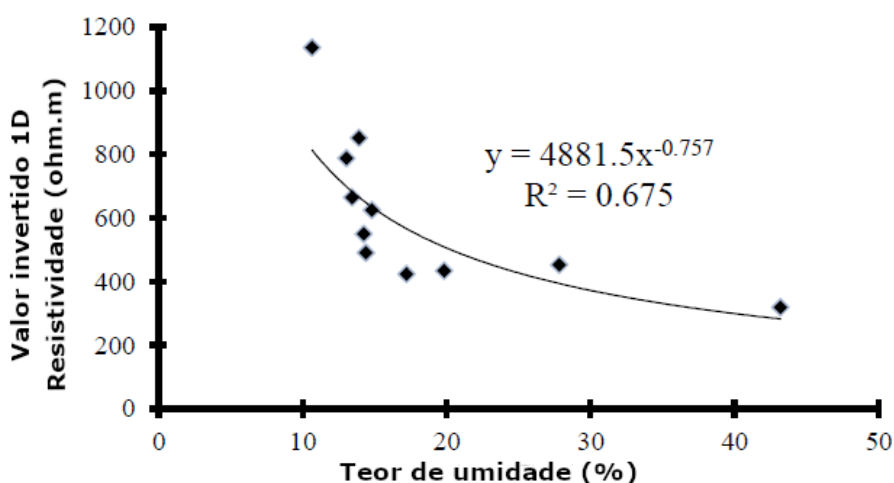


Figura 30: Correlação entre teor de umidade e resistividade elétrica.

Fonte: Adaptado de Hatta e Osman (2015).

Ferreira et al. (2021) obtiveram uma correlação inversa entre a resistividade e o teor de umidade volumétrica para um solo tropical típico do cerrado brasileiro, classificado como Latossolo vermelho-amarelo. Os resultados são mostrados na Figura 31 e na Tabela 2. Foram gerados três modelos de correlação (exponencial, logarítmico e potência) para os horizontes A, Bw e C do solo estudado, com três repetições para cada horizonte.

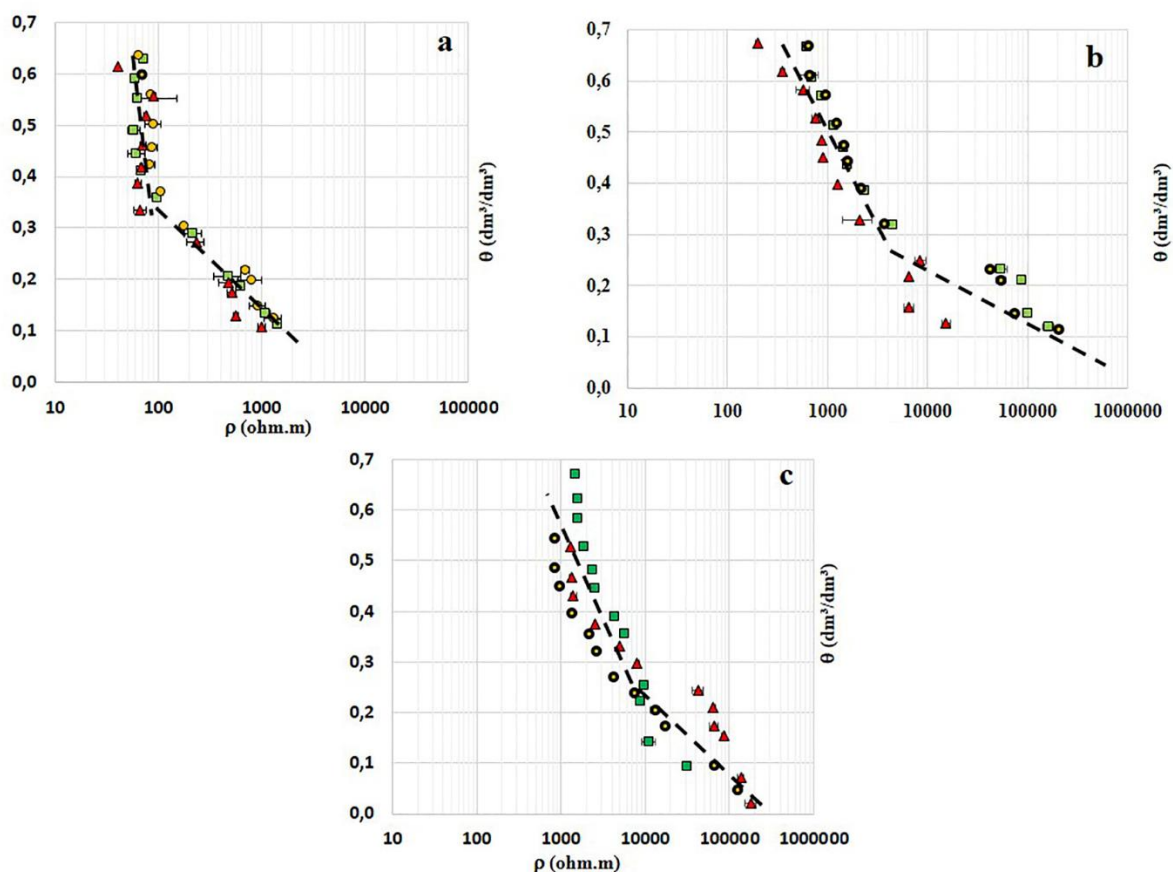


Figura 31: Valores de teor de umidade volumétrica plotados em função da resistividade elétrica, para os horizontes A (a) Bw (b) e C (c).

Fonte: adaptado de Ferreira et al. (2021).

Tabela 2: Modelos de correlação entre teor de umidade volumétrica e resistividade, obtidos por Ferreira et al. (2021).

		Horizonte A				Horizonte Bw				Horizonte C			
		1	2	3	Geral	1	2	3	Geral	1	2	3	Geral
E	a	0,49	0,49	0,52	0,41	0,53	0,45	0,48	0,41	0,54	0,35	0,44	0,29
	b	-1E-03	-2E-03	-1E-03	-1E-03	-1E-04	-8E-06	-1E-05	-9E-06	-7E-05	-2E-05	-1E-05	-2E-05
	R ²	0,87	0,86	0,89	0,82	0,82	0,73	0,86	0,54	0,81	0,85	0,95	0,77
	RMSE	-	-	-	0,078	-	-	-	0,126	-	-	-	0,083
L	a	-0,14	-0,14	-0,14	-0,12	-0,09	-0,08	-0,13	-0,08	-0,19	-0,08	-0,09	-0,07
	b	1,06	1,13	1,06	0,91	1,12	1,09	1,37	1,04	1,98	1,02	1,06	0,87
	R ²	0,86	0,87	0,82	0,83	0,91	0,91	0,96	0,83	0,94	0,94	0,94	0,80
	RMSE	-	-	-	0,060	-	-	-	0,070	-	-	-	0,058
P	a	3,50	3,91	3,86	3,06	3,12	3,53	6,17	2,89	60,55	8,48	9,19	7,80
	b	-0,47	-0,47	-0,51	-0,47	-0,26	-0,27	-0,39	-0,26	-0,62	-0,41	-0,39	-0,42
	R ²	0,95	0,94	0,90	0,91	0,95	0,96	0,93	0,86	0,95	0,96	0,70	0,80
	RMSE	-	-	-	0,058	-	-	-	0,057	-	-	-	0,059

E - Exponencial: $\theta = a.e^{(-bp)}$ L - Logarítmico: $\theta = a.logp+b$ P - Potência: $\theta = a.p^{(-b)}$

Condé (2018) obteve uma correlação entre o teor de umidade e a constante dielétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo, no município de Viçosa (MG), através da aquisição de dados por radar de penetração no solo (GPR) e do processamento e análise dos radargramas obtidos. O valor da constante dielétrica para o solo foi estimado através da técnica de ajuste de hipérbolos. Com os resultados obtidos foi proposto o seguinte modelo de regressão linear simples:

$$U = -7,637 \times 10^{-5} + 1,849 \times 10^{-2}K + 2,019 \times 10^{-3}P - 1,349 \times 10^{-4}KP \quad (5)$$

Sendo U é a umidade volumétrica do solo, K é a constante dielétrica observada no ponto de coleta e P é a profundidade média de coleta da amostra de solo.

Além deste trabalho, diversos autores também propuseram modelos empíricos correlacionando o teor de umidade e a constante dielétrica. Um resumo desses resultados é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Modelos empíricos correlacionando o teor de umidade e a constante dielétrica.

Autor	Modelo proposto
Topp et al. (1980), apud Condé (2018)	$U = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2}K + 4,3 \times 10^{-6}K^3$
Ledieu et al. (1986), apud Condé (2018)	$U = 0,1138\sqrt{K} - 0,1756$
Roth et al. (1990), apud Condé (2018)	$U = -7,8 \times 10^{-2} + 4,48 \times 10^{-2}K - 1,95 \times 10^{-3}K^2 + 3,61 \times 10^{-5}K^3$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, a metodologia utilizada contemplou as seguintes atividades:

- Inspeção visual realizada no maciço da barragem;
- Aquisição de dados geofísicos e coleta de amostras de solo em campo;
- Consulta bibliográfica a trabalhos realizados anteriormente na barragem estudada;
- Ensaio de laboratório para análise das amostras de solo coletadas;
- Utilização de softwares apropriados para o tratamento e processamento dos dados geofísicos adquiridos;
- Interpretação e integração de todos os resultados obtidos.

A seguir são descritas a área de estudo do presente trabalho e todas as atividades executadas.

3.1 A barragem estudada

O barramento estudado se localiza no Campus Viçosa da Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao lado do Supermercado Escola. A principal função dessa barragem é de reservatório de água, e em seu lago é realizada a captação de água pela UFV e pelo SAAE (Serviço Autônomo de Águas e Esgoto) para o abastecimento do Campus e do município de Viçosa.

As Figuras 32 e 33 mostram, respectivamente, a localização do Campus Viçosa da UFV e uma vista aérea da área onde a barragem se localiza, evidenciando esta estrutura.

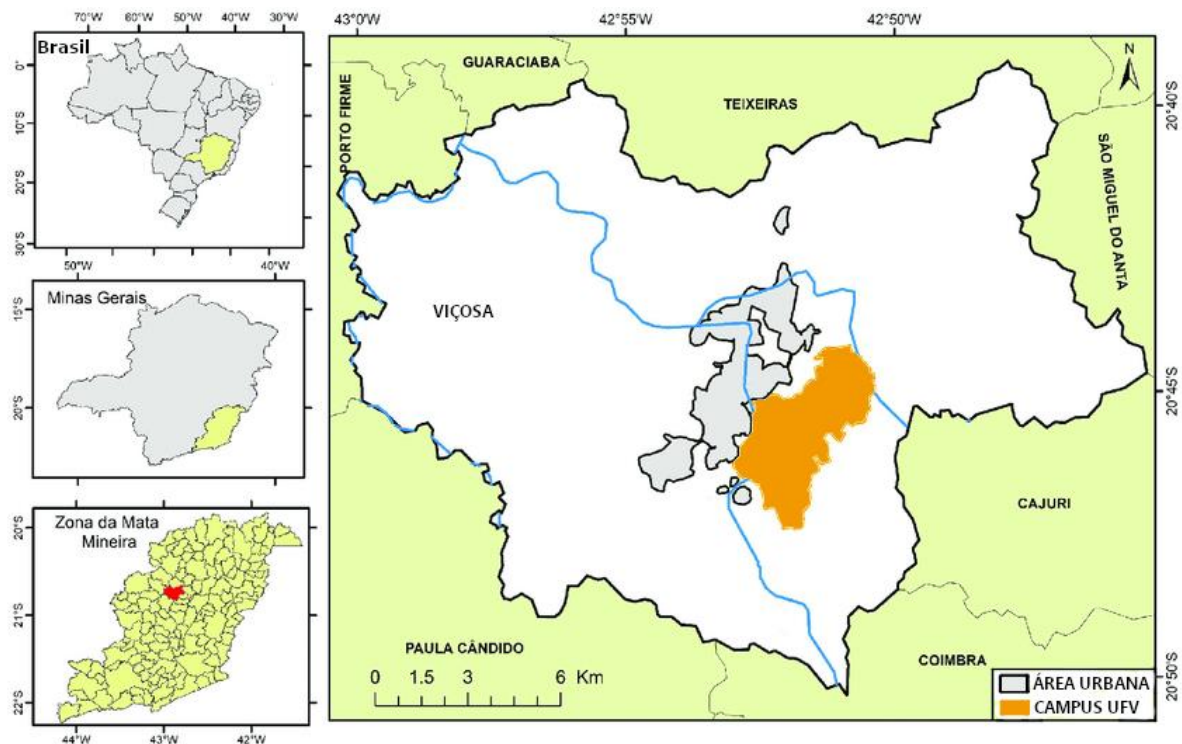


Figura 32: Localização do Campus Viçosa da UFV.

Fonte: Adaptado de Avila-Diaz et al. (2020).



Figura 33: Vista aérea da barragem e do seu entorno.

O barramento é uma estrutura geotécnica de pequeno porte, que foi construída

como um aterro de solo compactado, e não apresenta estruturas de controle de percolação de água através do maciço, como filtros ou tapetes drenantes. Existem duas estruturas destinadas ao escoamento do excesso de água, sendo um vertedouro de seção retangular e revestido de concreto, posicionado no corpo da barragem, e um canal extravasor localizado na margem do reservatório, que é revestido parte por grama natural e parte por concreto. O vertedouro se encontra em funcionamento com maior frequência ao longo do tempo, controlando o nível da água no reservatório, enquanto o canal extravasor só entra em funcionamento em períodos de chuvas intensas.

A Figura 34 apresenta um modelo do relevo do local estudado, no qual as cotas são representadas pelas respectivas curvas de nível. São indicadas as posições do eixo da barragem, do vertedouro e do canal extravasor, com os sentidos de fluxo indicados pelas setas.

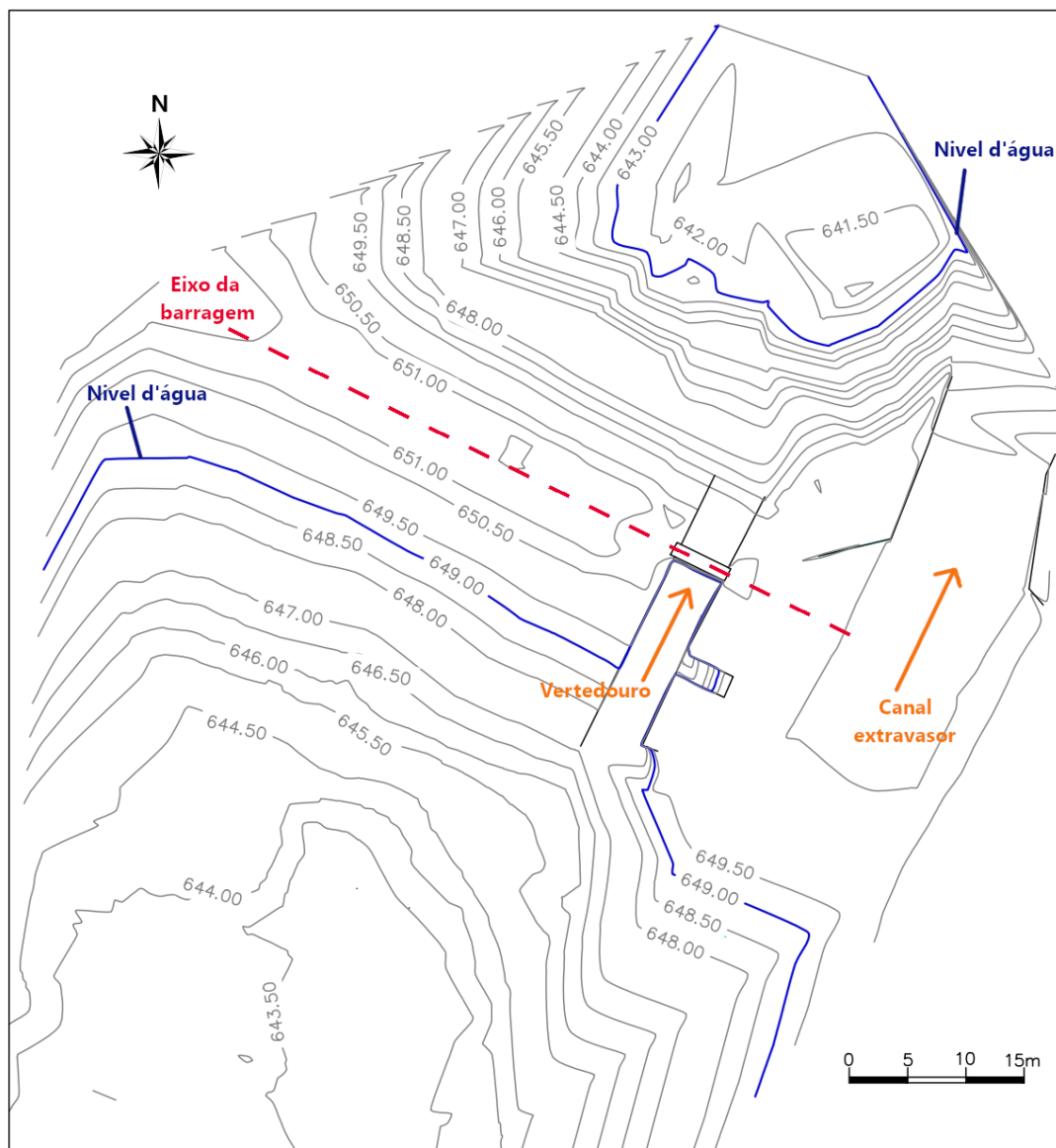


Figura 34: Relevo do local estudado.

Fonte: Adaptado de UFV (2018).

Dados bibliográficos de investigações geotécnicas realizadas anteriormente (DALMASCHIO et al., 2019) indicaram que o barramento se apresentava estável à época, mas também que foi detectada uma considerável perda de água através da camada de fundação. Foi observada a existência de uma cavidade erosiva no paramento de jusante da estrutura, justaposta à casa de bombas da captação de água mostrada na Figura 35, como resultado de um processo de erosão interna (piping). De maneira a se evitar o colapso da casa de bombas e o avanço do processo erosivo, foram efetuadas intervenções no local com o objetivo de sua recuperação emergencial

através da compactação de uma mistura de solo-cimento.



Figura 35: Vista do local onde foi identificada a cavidade erosiva.

Resultados de três furos de sondagem a percussão indicaram a existência três camadas principais de solo em profundidade:

- Um aterro com textura entre silte arenoso e argila siltosa de cor vermelha, com mica, que constitui o corpo da barragem;
- Uma camada de argila siltosa de cor cinza escura, com matéria orgânica, localizada sob o paramento de montante;
- Uma camada de aluvião composto por uma areia fina e média, escura, com presença de matéria orgânica, mica e pedregulho, que constitui o material a fundação da barragem.

A Figura 36 mostra uma seção transversal da barragem obtida a partir dos resultados obtidos nos furos de sondagem à percussão.

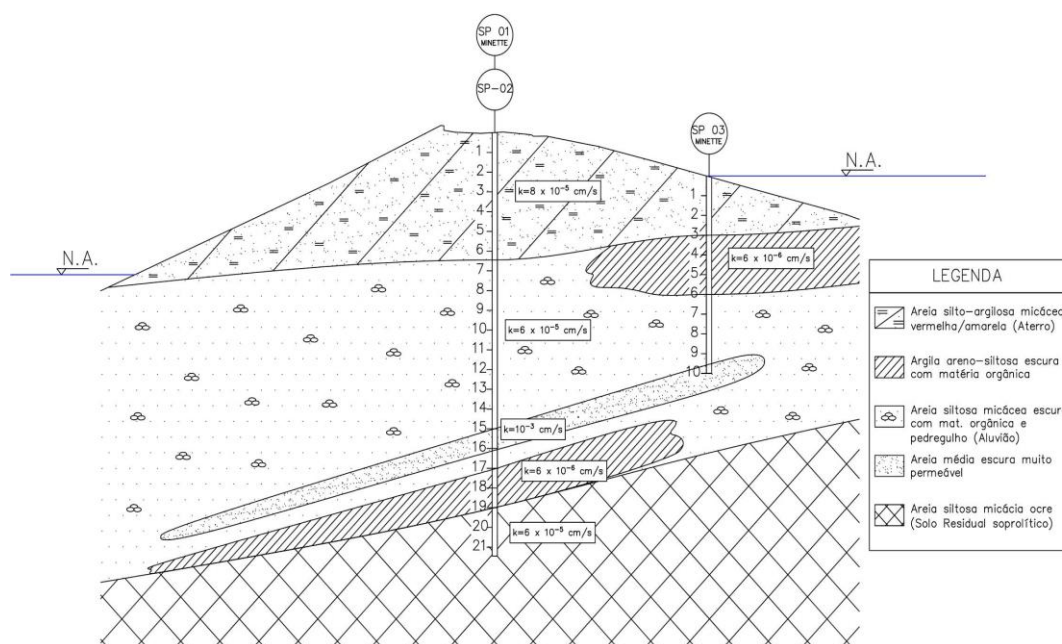


Figura 36: Seção transversal da barragem.

Fonte: Dalmaschio et al. (2019).

3.2 Inspeção visual no maciço da barragem

A primeira etapa da campanha de investigações contemplada no presente trabalho consistiu na realização de uma inspeção visual no maciço da barragem estudada. Este procedimento teve como principais objetivos a identificação de objetos e estruturas presentes no maciço que pudessem gerar interferências ou anomalias nos resultados das investigações geofísicas, assim como a definição do posicionamento das linhas de investigação onde os métodos geofísicos foram aplicados, a fim de que essas linhas interceptassem todos os pontos de interesse identificados.

No corpo da barragem, foram identificadas diversas tubulações superficiais que fazem parte do sistema de captação da água do reservatório, e notou-se a presença de formigueiros de grande extensão e árvores de grande porte no talude de jusante. Já na margem do reservatório, foi identificado o afloramento de uma tubulação metálica subterrânea, e notou-se a presença de diversas árvores de grande porte e de placas de concreto cravadas na superfície do terreno.

Não foram identificados indícios de patologias, como trincas e cavidades erosivas, no maciço da barragem. No local onde foi anteriormente identificada a cavidade erosiva gerada pelo processo de piping, não foi observada surgência de água na superfície do terreno, indicando que as intervenções realizadas para contenção do fluxo foram bem sucedidas.

3.3 Investigações geofísicas realizadas

A campanha de investigações geofísicas contemplou os seguintes métodos:

- Eletrorresistividade em duas dimensões, por meio da execução de SEVMEs;
- Potencial espontâneo (SP);
- Radar de penetração no solo (GPR).

Para a aplicação desses métodos no maciço do barramento, foram definidas oito linhas de investigação, com o objetivo de cobrir a maior área possível em superfície. Cinco linhas foram posicionadas na superfície do corpo da barragem, paralelas ao seu eixo, contemplando os taludes de montante e de jusante, assim como a sua crista, enquanto as três linhas restantes foram posicionadas paralelamente ao canal extravasor, às margens do lago do reservatório. Os levantamentos de resistividade elétrica, potencial espontâneo e GPR foram realizados sobre as mesmas linhas, de modo a proporcionar redundância de dados geofísicos utilizando métodos distintos.

Para auxiliar a definição e a locação das linhas de investigação, foi utilizada uma imagem aérea georeferenciada da área estudada, obtida a partir de mapeamento por drone. Essa imagem aérea permitiu a obtenção das coordenadas geográficas, no sistema UTM, de todos os pontos de interesse observados durante a etapa de inspeção visual, o que facilitou a interpretação e o processamento dos dados geofísicos coletados.

A aquisição dos dados geofísicos utilizados no presente trabalho foi executada com o auxílio de profissionais da Neogeo Geotecnologia, de Belo Horizonte/MG.

Destaca-se que, à época da aquisição dos dados geofísicos, a cota do nível d'água no reservatório era de aproximadamente 649,0 metros. Além disso, os dados

foram adquiridos durante um período de chuvas intensas, que influenciaram os resultados obtidos. A Tabela 4 apresenta o quantitativo das chuvas no mês de dezembro de 2019, até a data do término da campanha de investigações geofísicas (UFV, 2021).

Tabela 4: Quantitativo das chuvas no mês de dezembro/2019.

Fonte: UFV (2021).

Dezembro/2019					
Dia	chuva (mm)	Dia	chuva (mm)	Dia	chuva (mm)
1	5,4	8	0,2	15	0,0
2	60,4	9	0,6	16	0,0
3	1,0	10	5,4	17	0,0
4	4,4	11	20,2	18	0,0
5	0,0	12	32,8	19	3,0
6	55,4	13	0,2		
7	20,4	14	0,0		

A configuração geométrica das linhas de investigação na área de estudo, assim como a sua descrição, são mostradas na Figura 37 e na Tabela 5. Na Figura 37, os pontos “A” e “B” indicam, respectivamente, os pontos inicial e final de cada linha.

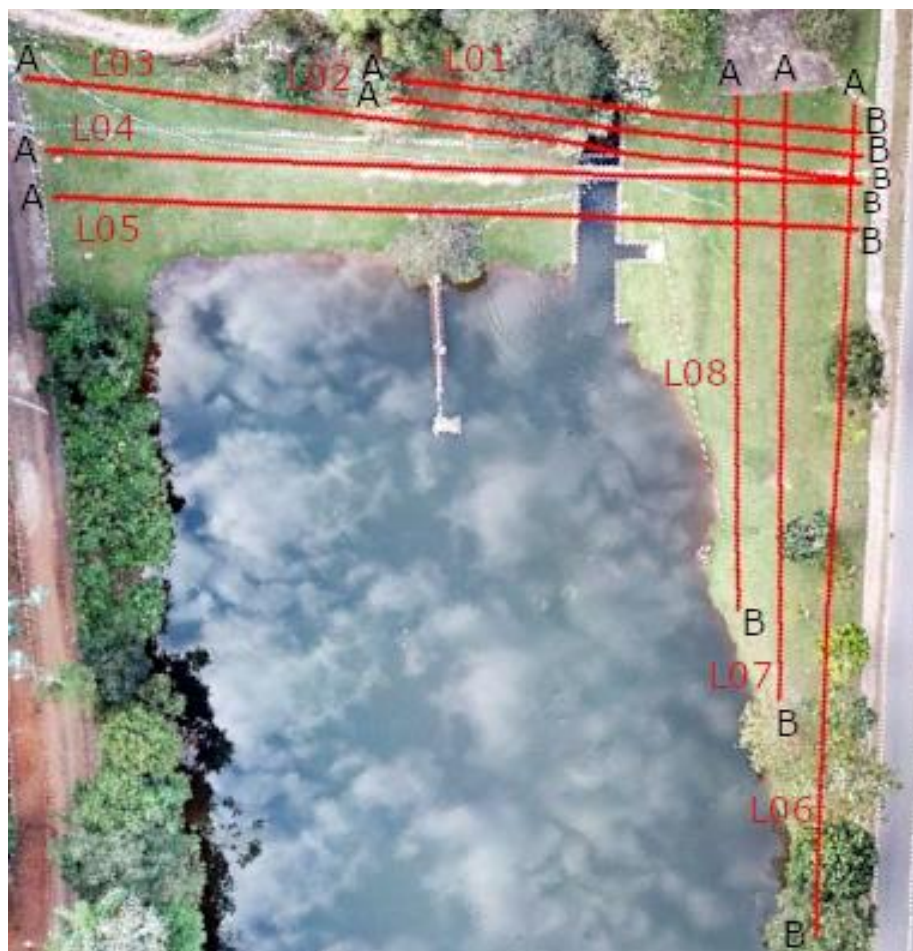


Figura 37: Configuração geométrica das linhas de investigação geofísica.

Tabela 5: Linhas definidas para a aplicação das investigações geofísicas.

Linhas de investigação								
Linha	Comp. (m)	Local	Norte (início)	Este (início)	Cota (início)	Norte (final)	Este (final)	Cota (final)
L01	53,00	Tal. Jusante	7702315,88	721743,09	648,18	7702288,87	721787,52	650,83
L02	53,00	Tal. Jusante	7702314,01	721741,95	649,21	7702286,64	721786,48	650,88
L03	93,00	Tal. Jusante	7702333,19	721706,08	653,02	7702284,77	721784,70	650,74
L04	90,00	Crista	7702324,77	721704,84	652,51	7702283,82	721785,16	650,86
L05	89,00	Tal. Montante	7702319,96	721703,42	652,66	7702279,39	721782,80	650,84
L06	92,00	Margem da lagoa	7702292,05	721788,03	650,71	7702210,63	721745,74	651,32
L07	67,00	Margem da lagoa	7702296,48	721781,93	649,32	7702236,03	721753,16	651,01
L08	57,00	Margem da lagoa	7702298,45	721776,66	649,34	7702246,89	721753,10	650,50

3.3.1 Eletrorresistividade

O levantamento de eletrorresistividade foi feito a partir da execução de um conjunto de SEVMEs ao longo das linhas L01 a L08.

Os equipamentos utilizados, mostrados na Figura 38, foram os seguintes:

- Resistímetro modelo Super Sting R8 IP, da marca AGI (Advanced Geosciences Inc.), de 64 canais (indicado pela letra “a” na Figura);
- Switch box acoplada ao resistímetro, da marca AGI (indicado pela letra “b” na Figura);
- Conjunto de eletrodos metálicos acoplados ao solo (indicado pela letra “c” na Figura);

O levantamento teve a seguinte parametrização:

- Arranjo utilizado: combinação entre Dipolo-Dipolo e Gradiente;
- Espaçamento entre os eletrodos: 1 metro;
- Profundidade aproximada de investigação: 16 metros.

Para a medida da resistividade elétrica em subsuperfície, os eletrodos foram cravados no solo ao longo das linhas de investigação, utilizando-se quando necessário uma solução salina para melhorar o acoplamento eletrodo-solo. As leituras de resistividade foram feitas pelo resistímetro, conectado aos eletrodos por meio de cabos multicanais, enquanto a switch box mudava automaticamente as posições dos eletrodos A, B, M e N após cada medida.

O arranjo de eletrodos utilizado foi escolhido por apresentar boa resolução e uma elevada razão sinal/ruído para o espaçamento adotado entre os eletrodos. Além disso, por ser sensível a variações horizontais de eletrorresistividade, esse arranjo se torna eficaz na identificação de anomalias ao longo das camadas de material (aterro e fundação) da barragem estudada. A combinação entre os arranjos Dipolo-dipolo e Gradiente foi feita de forma automática, através do software EarthImager.

Detalhes do processo de aquisição de dados são mostrados nas Figuras 39 a 41, enquanto o resumo das linhas executadas para a aquisição de dados é apresentado na Tabela 6.

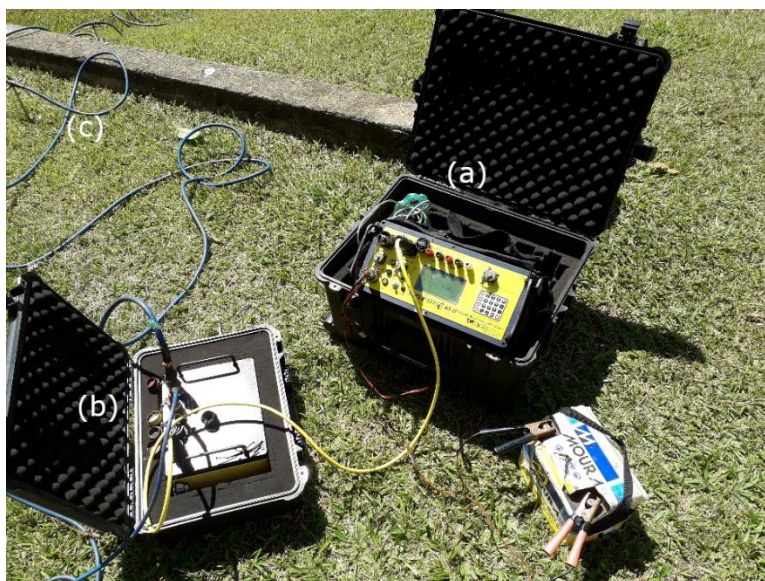


Figura 38: Equipamentos utilizados na aquisição dos dados de eletroresistividade 2D.



Figura 39: Eletrodos posicionados em uma das linhas de investigação.



Figura 40: Detalhe dos eletrodos cravados no solo.

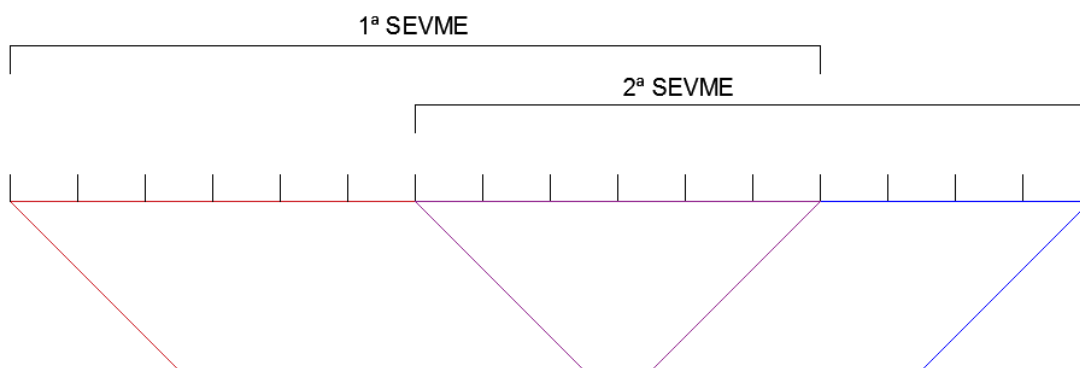


Figura 41: Aplicação da solução salina nos eletrodos.

Tabela 6: Resumo das linhas de Eletrorresistividade 2D executadas.

Id Linha	Data	Roll-Along	Quant. Eletrodos	Espaçamento dos Eletrodos	Tamanho Ideal
L01	17/12/2019	Não	54	1 m	53 m
L02	17/12/2019	Não	54	1 m	53 m
L03	17/12/2019	Sim	96	1 m	95 m
L04	17/12/2019	Sim	92	1 m	91 m
L05	18/12/2019	Sim	91	1 m	90 m
L06	18/12/2019	Sim	93	1 m	92 m
L07	18/12/2019	Sim	68	1 m	67 m
L08	18/12/2019	Não	58	1 m	57 m

A técnica do *roll-along* foi utilizada nas linhas de investigação cujo comprimento era maior do que a extensão total do arranjo de eletrodos (63 metros). Nessa técnica, duas SEVMEs consecutivas são executadas sobre a linha, a fim de se cobrir toda a sua extensão, de modo que elas fiquem tão sobrepostas quanto possível, para que não sejam perdidos pontos de investigação na subsuperfície. Um esquema dessa técnica é mostrado na Figura 42.

Figura 42: Esquema da técnica do *roll-along*.

Nas linhas que passavam pelo vertedouro da barragem, os eletrodos correspondentes à posição do vertedouro não foram acoplados, devido à impossibilidade de se acessar o fundo dessa estrutura. Assim, não foram realizadas leituras de eletrorresistividade nos pontos em subsuperfície correspondentes a esses eletrodos. Um exemplo dessa situação na linha L01 é mostrado na Figura 43.

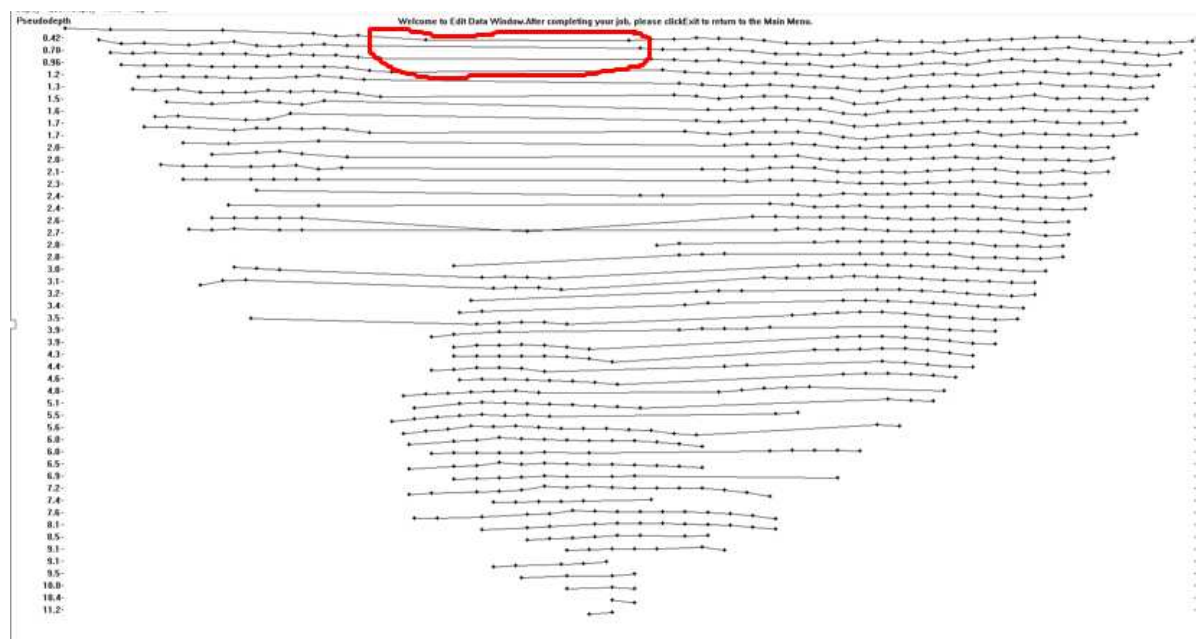


Figura 43: Efeito da ausência dos eletrodos correspondentes à posição do vertedouro na linha L01.

3.3.2 Potencial espontâneo

O levantamento de potencial espontâneo foi feito a partir da medida do potencial em subsuperfície ao longo das linhas L01 a L08.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Resistímetro do modelo SAS 1000, da marca ABEM, com 2 canais;
- Multímetro;
- Um par de eletrodos não polarizados, feitos de material cerâmico;
- Cabos metálicos para conectar os eletrodos aos aparelhos.

A medição do potencial espontâneo em subsuperfície foi feita utilizando-se a técnica dos potenciais, sendo que o eletrodo mantido fixo foi cravado no solo na crista da barragem, entre as linhas L04 e L05, enquanto o outro era posicionado em pequenas covas feitas ao longo das linhas de investigação, sendo movimentado a cada medida respeitando-se o espaçamento de três metros entre cada cova. As coordenadas do eletrodo fixo são apresentadas na Tabela 7, enquanto uma imagem aérea da barragem, com a posição desse eletrodo em destaque, é mostrada na Figura

44.

Tabela 7: Coordenadas do eletrodo fixo do levantamento de SP.

Eletrodo fixo - levantamento SP		
Norte	Este	Cota
7702301,856	721746,957	651,294



Figura 44: Vista aérea da barragem, com destaque para a posição do eletrodo fixo.

As leituras de potencial eram efetuadas quando os dois eletrodos eram conectados ao resistivímetro sem a injeção de corrente elétrica, e os resultados a cada medida eram salvos na memória do próprio aparelho. No início e no final das leituras em cada linha de investigação, um multímetro era utilizado para medir o potencial em um ponto próximo ao eletrodo fixo, o que foi feito como um meio de calibração das medidas efetuadas ao longo das linhas.

Em cada medida o eletrodo móvel foi limpo com água desmineralizada, procedimento que teve como objetivo melhorar o contato eletrodo-solo. Além disso, no interior dos eletrodos era adicionada uma solução de sulfato de cobre (CuSO_4) para facilitar o contato eletrodo-solo.

Os equipamentos utilizados e as diversas etapas do processo de aquisição de dados podem ser vistos nas Figuras 45 a 48, enquanto o resumo das linhas executadas para a aquisição de dados é apresentado na Tabela 8.



Figura 45: Resistivímetro usado na medição do potencial espontâneo.



Figura 46: Preparação dos eletrodos não polarizados.



Figura 47: Posicionamento do eletrodo fixo.



Figura 48: Calibração das medidas com o multímetro.

Tabela 8: Resumo das linhas de potencial espontâneo executadas.

Id Linha	Data	Espaçamento entre as cavas	Tamanho Ideal
L01	19/12/2019	3 m	51 m
L02	19/12/2019	3 m	51 m
L03	19/12/2019	3 m	93 m
L04	19/12/2019	3 m	90 m
L05	19/12/2019	3 m	90 m
L06	19/12/2019	3 m	90 m
L07	19/12/2019	3 m	69 m
L08	19/12/2019	3 m	60 m

3.3.3 GPR

A aquisição dos dados referentes ao método GPR foi feita a partir da execução de levantamentos realizados com o radar de penetração no solo, ao longo das linhas L01 a L08.

Os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Radar do modelo IDS Fast Wave;
- Antena blindada de 200 MHz;
- Computador portátil.

O levantamento teve as seguintes características:

- Aquisição de dados do tipo dinâmica (radar em movimento);

- Intervalo entre traços: 0.043 m;
- Amostras: 512;
- Intervalo de amostragem: 0,5 ns;
- Janela de Tempo: 256 ns.

Para a aquisição dos dados, o radar foi movimentado ao longo das linhas de investigação enquanto o mesmo enviava o sinal das ondas eletromagnéticas em subsuperfície e recebia o sinal das ondas refletidas. Ao longo do percurso, o computador conectado ao radar processava o sinal das ondas EM recebido pelo radar, permitindo a sua visualização em tempo real. Devido à impossibilidade de se acessar o fundo do vertedouro, não houve imageamento por GPR através dessa estrutura, assim as linhas de investigação que passam pelo vertedouro foram adquiridas em duas seções cada uma delas.

Os equipamentos utilizados e o processo de aquisição de dados podem ser vistos nas Figuras 49 e 50, e um resumo das linhas executadas para a aquisição de dados é apresentado na Tabela 9.



Figura 49: Radar utilizado na aquisição de dados do método GPR.



Figura 50: Radar sendo operado em campo pela equipe de trabalho.

Tabela 9: Resumo das linhas de GPR executadas.

Id Linha	Data	Tamanho Executado
L01.1	16/12/2019	19,71 m
L01.2	16/12/2019	25,79 m
L02.1	16/12/2019	19,86 m
L02.2	16/12/2019	27,36 m
L03.1	16/12/2019	60,71 m
L03.2	16/12/2019	26,36 m
L04	16/12/2019	90,44 m
L05.1	16/12/2019	56,67 m
L05.2	16/12/2019	22,40 m
L06	16/12/2019	91,75 m
L07	16/12/2019	66,98 m
L08	16/12/2019	56,73 m

Pelas informações de trabalhos anteriores, que incluíam sondagem e descrição dos materiais encontrados na barragem estudada (DALMASCHIO et al., 2019; UFV, 2018), presumiu-se antes da coleta de dados que os principais alvos interceptados pelas ondas EM estariam a uma profundidade relativamente baixa. Assim, a frequência da antena de 200 MHz foi escolhida por oferecer uma imagem de alta resolução, em detrimento de uma penetração baixa na subsuperfície.

3.4 Processamento dos dados geofísicos

Após a execução da campanha de investigações geofísicas, os dados adquiridos foram armazenados e processados em softwares apropriados. Esse procedimento teve como objetivo obter as seguintes informações:

- As seções de eletrorresistividade correspondentes às linhas de investigação executadas à região onde foi executada a aquisição tridimensional;
- A distribuição espacial dos valores de potencial espontâneo medidos;
- Os radargramas correspondentes às linhas de investigação executadas

O processamento dos dados geofísicos adquiridos no presente trabalho foi executado com o auxílio de profissionais da Neogeo Geotecnologia, de Belo Horizonte/MG.

3.4.1 Eletrorresistividade

As seções de resistividade elétrica foram obtidas a partir do processamento dos dados adquiridos na campanha de investigação pelo método da eletrorresistividade, utilizando-se o software RES2DINV, produzido pela GEOTOMO SOFTWARE.

Primeiramente, os dados coletados são expressos na forma de pseudo-seções de eletrorresistividade, que fornece a distribuição dos pontos em subsuperfície onde foi medida a resistividade. Essa distribuição é determinada pelo espaçamento adotado entre eletrodos e o arranjo utilizado na investigação. As pseudo-seções passaram por um processo de refinamento, no qual foram excluídos valores excessivamente altos ou baixos de resistividade. Após esse refinamento foi realizado o processo de inversão dos dados.

O processo de inversão é um procedimento matemático, que tem como objetivo ajustar os parâmetros do modelo de resistividade gerado a partir dos dados observados na aquisição em campo (REYNOLDS, 2011). Para a inversão dos dados, o software RES2DINV gera um modelo de resistividade aplicando uma malha de elementos finitos, que é modificada em um processo iterativo, até que a diferença

entre o modelo observado e o calculado fique abaixo de um valor aceitável. Dados topográficos do local estudado também foram integrados aos modelos gerados.

O resultado final do processamento dos dados foram as seções de eletrorresistividade referentes às oito linhas de investigação, nas quais os valores de resistividade elétrica em subsuperfície são apresentados em uma escala gráfica.

3.4.2 Potencial espontâneo

A distribuição dos valores de potencial espontâneo na área estudada foi obtida a partir da análise dos dados adquiridos na campanha de investigação de campo, utilizando-se o software *Microsoft Excel*.

Primeiramente, foi aplicado o processo de correção de base nos dados coletados, no qual as medidas são corrigidas a partir da diferença entre os potenciais observados no eletrodo fixo, no início e no final da aquisição, a fim de remover o erro associado a alterações do meio durante esse intervalo de tempo. Após esse processo, os modelos corrigidos de distribuição de potencial passaram por um refinamento, no qual valores espúrios foram removidos.

Os dados coletados em cada linha de investigação são expressos na forma de um gráfico, em que o valor do potencial é função da posição do eletrodo ao longo da linha. Um exemplo desse procedimento é mostrado na Figura 51.

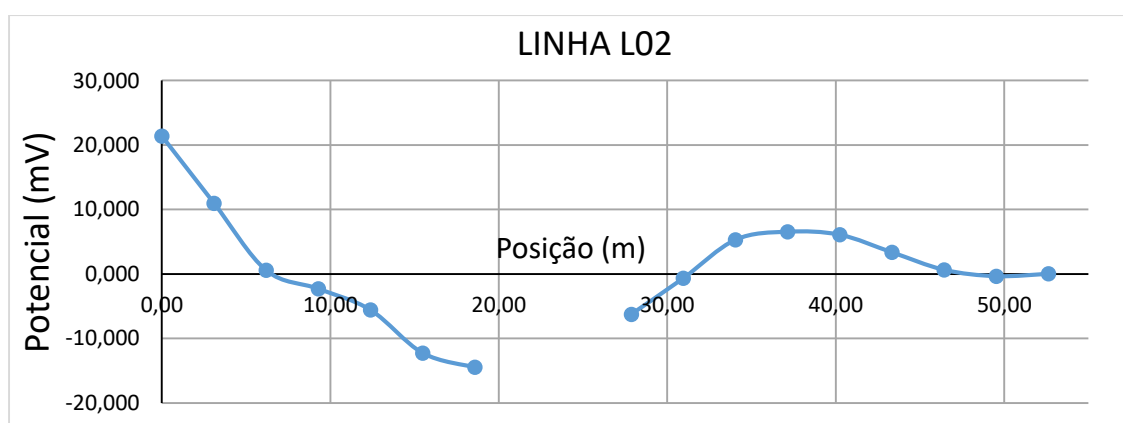


Figura 51: Gráfico potencial versus posição do eletrodo para a linha L02.

Os valores de potencial também foram integrados aos dados topográficos do

local estudado, sendo calculado um modelo de distribuição em área dos valores de potencial, utilizando-se o software Surfer, produzido pela *Goldensoftware*. Para a obtenção do modelo, o software aplica um processo de krigagem, que é um interpolador no qual o peso de cada ponto é determinado pela sua distância em relação ao nó calculado na malha. O resultado final é um mapa apresentando a distribuição dos valores de potencial, representados por uma escala gráfica.

Para estimar a localização em subsuperfície das fontes das anomalias de SP identificadas, foi aplicada a metodologia desenvolvida por Bhattacharya e Roy (1981), ilustrada na Figura 52. Para as anomalias que persistiam nos resultados de duas ou mais linhas paralelas, optou-se por assumir a geometria cilíndrica para as fontes, por ser essa a geometria das estruturas normalmente encontradas na subsuperfície de ambientes urbanos, como tubulações de água, esgoto e redes elétricas, sendo, portanto, a mais próxima do contexto do local estudado. Assim, foram aplicadas as seguintes equações:

$$\frac{|V_{\min}|}{V_{\max}} = \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \quad (6)$$

$$h = \frac{d}{2} \cos \alpha \quad (7)$$

$$x_0 = \frac{h}{\cot \alpha} \quad (8)$$

Onde:

- V_{\min} e V_{\max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, de potencial na anomalia;
- α é o ângulo de polarização da fonte (parâmetro geométrico);
- h é a profundidade da fonte;
- d é a distância horizontal entre os pontos que apresentam V_{\min} e V_{\max} ;
- x_0 é a distância horizontal entre a fonte e o ponto de potencial nulo.

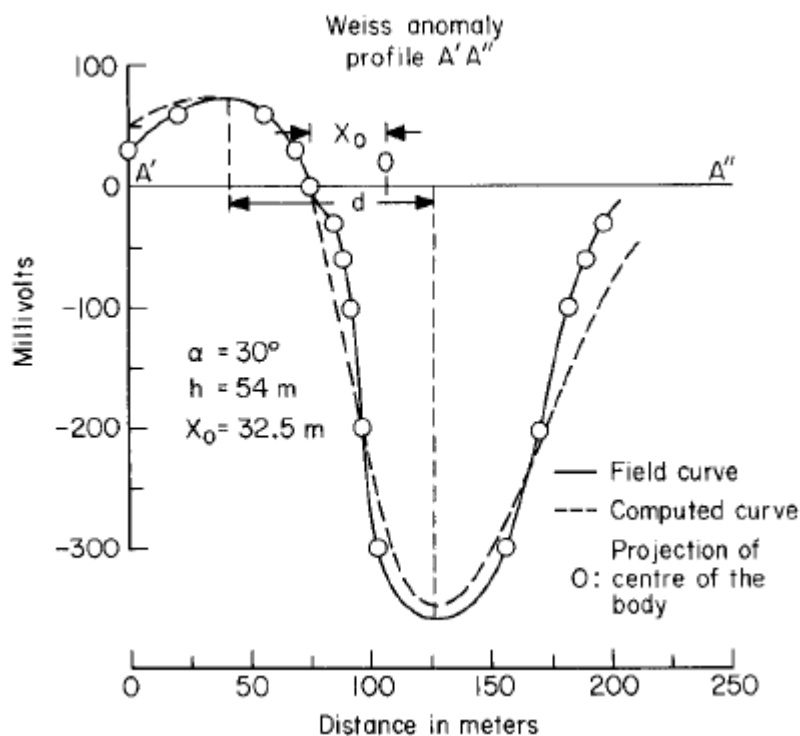


Figura 52: Método gráfico para a localização da fonte de anomalia de SP.

Fonte: Bhattacharya e Roy (1981).

3.4.3 GPR

Os radargramas foram obtidos a partir do processamento dos dados adquiridos na campanha de investigação por radar de penetração no solo, utilizando-se o software ReflexW, desenvolvido pela *Sandmeier geophysical research*. Para melhoria do sinal das ondas eletromagnéticas nos radargramas, foi aplicado o seguinte fluxo de processamento:

- Correção da topografia: integração dos dados topográficos ao sinal do GPR, para atribuir coordenadas a cada traço dos radargramas.
- Filtro dewow: remoção dos componentes de baixa frequência causados pela indução eletromagnética, eliminando ruídos do dado;
- Correção do tempo zero: ajuste do início da medição do tempo de propagação das ondas eletromagnéticas, para que o tempo zero corresponda à superfície do terreno;
- Regularização das distâncias entre traços: homogeneização da distância entre traços, para correção dos erros de posicionamento;

- Filtro passa-banda: remoção de ruídos de fundo de baixa frequência ou reflexões múltiplas, para aumento da resolução dos dados;
- Remoção do plano de fundo (*Background*): remoção das interferências de alta frequência, para aumento da resolução dos dados;
- Ganho de sinal: aumento da amplitude do sinal de baixa frequência, para compensar sua atenuação, para aumento da resolução da imagem.

No tratamento dos dados, a velocidade adotada das ondas eletromagnéticas para a conversão do tempo duplo do sinal em profundidade foi de 0,067 m/ns. Esta velocidade foi obtida através da técnica do ajuste de hipérboles. A Figura 53 mostra um exemplo da aplicação desse método na linha L01.1.

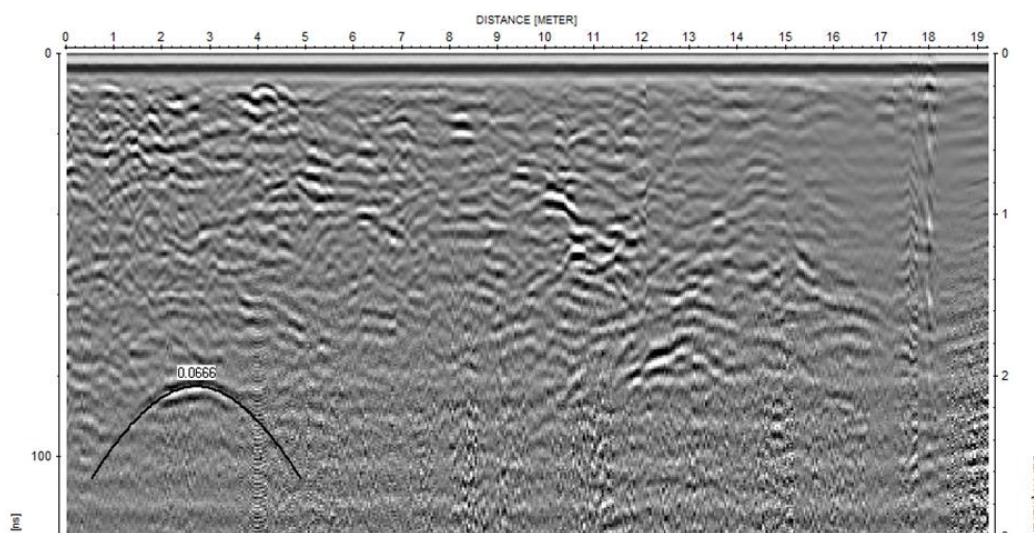


Figura 53: Aplicação da técnica da adaptação hiperbólica na linha L01.1.

3.5 Aquisição de dados geotécnicos

A seguir são descritas as atividades que contemplaram a aquisição de dados geotécnicos na barragem estudada.

3.5.1 Consulta bibliográfica a trabalhos anteriores

Foram consultados trabalhos contendo informações sobre furos de sondagem realizados no maciço estudado (DALMASCHIO et al., 2019; UFV, 2018; MINETTE,

2015) para a obtenção dos seguintes dados:

- Resultados de cinco ensaios SPT realizados em furos de sondagem ao longo do maciço da barragem, a partir dos quais foram obtidos os valores de resistência à penetração do amostrador e a descrição dos materiais investigados;
- Seções transversais e longitudinais da barragem, modeladas a partir dos resultados dos ensaios SPT, caracterizando tanto o maciço do aterro quanto a sua fundação.

A Figura 54 mostra uma vista aérea do corpo da barragem, destacando os pontos onde foram realizados os ensaios SPT consultados, enquanto as coordenadas desses pontos são apresentadas na Tabela 10.



Figura 54: Pontos onde foram realizados os ensaios SPT.

Tabela 10: Coordenadas dos pontos onde foram realizados os ensaios SPT.

Furo	Este	Norte	Cota
1M	721754,96	7702299,42	650,76
2M	721747,56	7702303,56	651,39
1E	721739,87	7702306,9	651,49
2E	721752,71	7702300,31	650,86
3E	721766,34	7702297,22	650,36

Também foram consultados trabalhos que apresentam um modelo hidrogeológico da área de estudo, apresentando a interação entre o reservatório e um

poço de captação de água posicionado a 35 metros da sua margem (ROCHA, 2015; FARIA, 2017), para que fossem analisados os seguintes dados:

- O traçado das superfícies potenciométricas na área compreendida entre o reservatório e o poço;
- Resultados de modelos numéricos indicando as direções de fluxo na área estudada durante os períodos de funcionamento e de inatividade do poço.

O poço analisado bombeia uma vazão que varia entre 5 e 9 m³/h, por um período de até 9 horas diárias (8 h às 17 h). Seu posicionamento em relação à margem do reservatório é mostrado na Figura 55, enquanto o resultado da modelagem numérica, indicando as direções de fluxo e as curvas equipotenciais durante o período de funcionamento do poço, é apresentado na Figura 56.

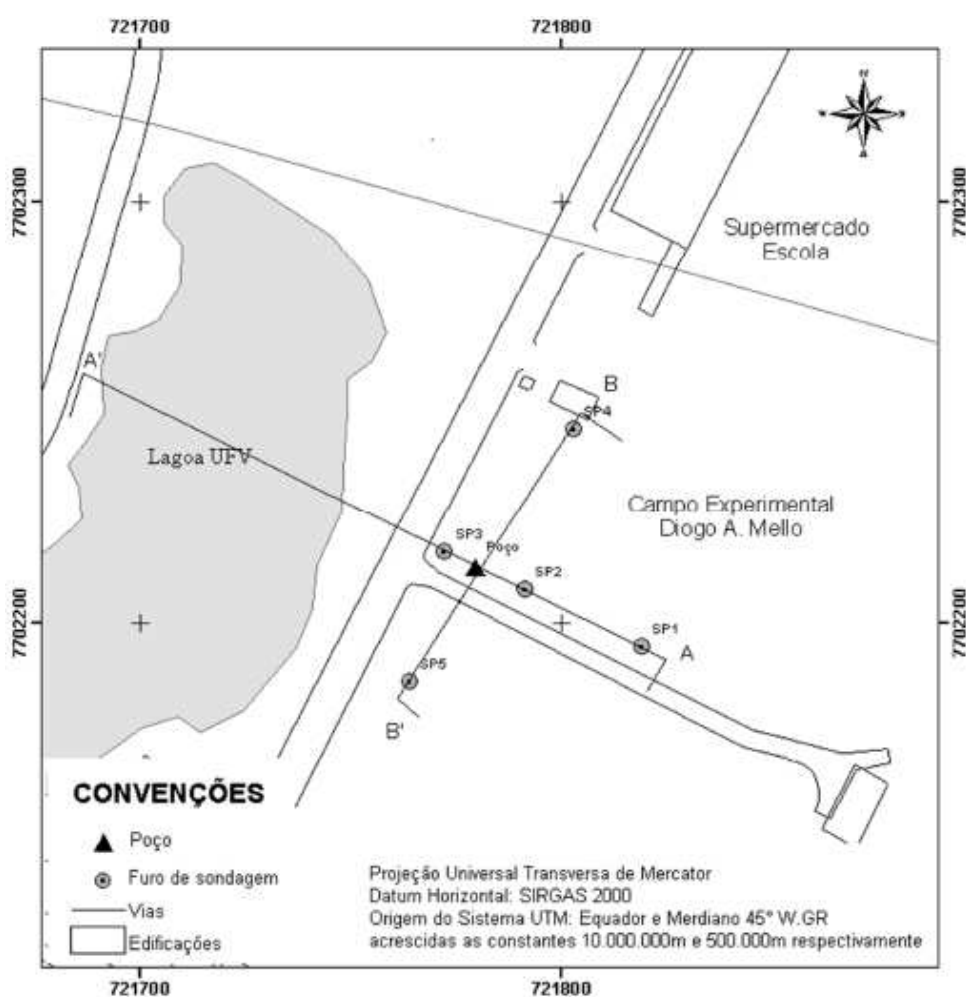


Figura 55: Localização do poço de captação de água.

Fonte: Rocha (2015).

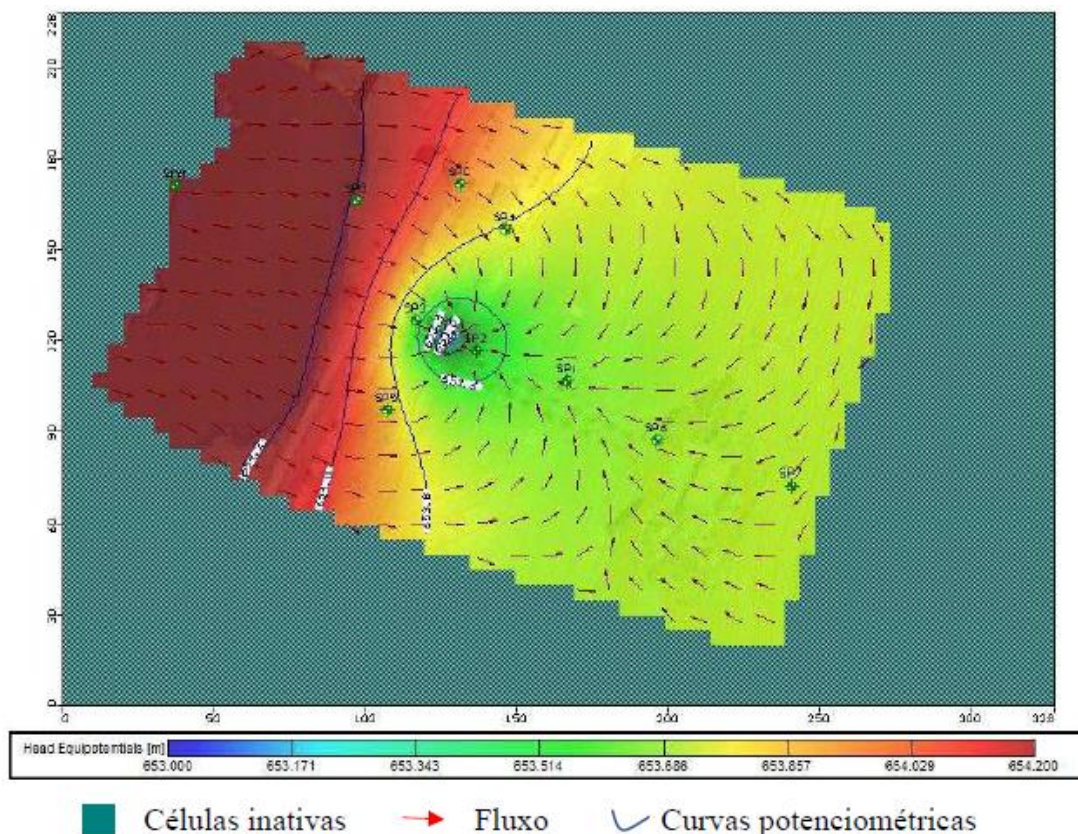


Figura 56: Resultado da modelagem numérica do fluxo subsuperficial entre o reservatório e o poço, durante seu funcionamento.

Fonte: Faria (2017).

Os dados consultados foram utilizados no presente trabalho para auxiliar e calibrar a interpretação dos dados geofísicos adquiridos. Os resultados dos ensaios SPT também foram utilizados na obtenção de modelos de correlação entre os dados geotécnicos e geofísicos adquiridos.

3.5.2 Coleta de amostras de solo

Foi realizada uma campanha de sondagens a trado para a coleta de amostras de solo ao longo do maciço da barragem e da margem do reservatório, com o objetivo de determinar a distribuição granulométrica dos materiais presentes na subsuperfície do local estudado.

Nesta campanha, procurou-se coletar amostras nas proximidades da superfície, de modo que as mesmas fossem tão representativas quanto possível da

região estudada, permitindo assim uma melhor interpretação dos dados geofísicos adquiridos. Foram coletadas amostras ao longo das linhas L02, L03, L04, L05 e L07, definidas durante a fase de investigações geofísicas.

Destaca-se que as sondagens foram realizadas posteriormente a uma primeira interpretação dos dados indiretos coletados. Este procedimento possibilitou direcionar a coleta das amostras em pontos específicos na subsuperfície identificados como anomalias ou pontos de interesse após a execução das investigações geofísicas.

A Figura 57 mostra uma vista aérea da barragem, com a localização dos furos de sondagem a trado executados, representadas pelos pontos azuis, e das linhas de investigação geofísica correspondentes a cada furo.

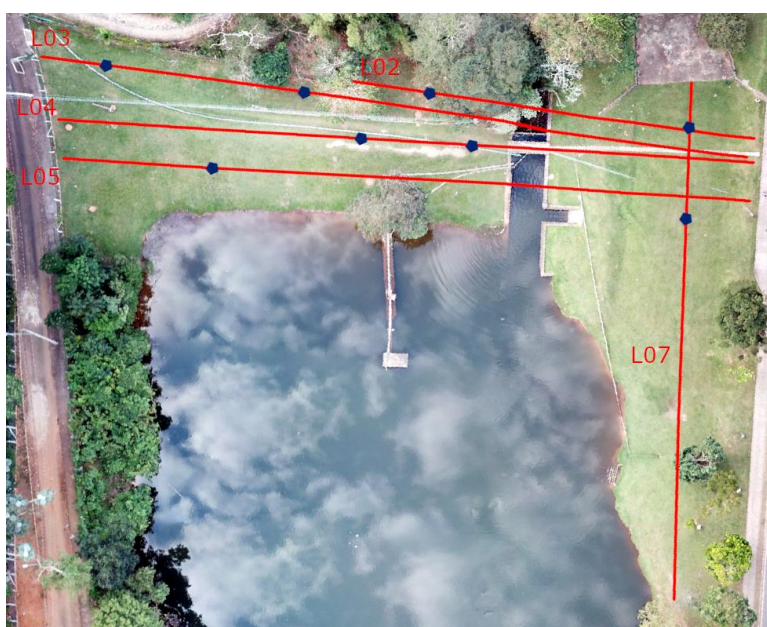


Figura 57: Vista aérea da barragem, destacando a localização dos furos de sondagem a trado executados.

A Tabela 11 mostra um resumo das informações sobre as amostras de solo coletadas na campanha de sondagens a trado.

Tabela 11: Informações sobre as amostras de solo coletadas na campanha de sondagem a trado.

Linha	Furo	Norte	Este	Amostra	Profundidade (m)
02	2.1	7702308,784	721750,363	2.1.1	0,50
				2.1.2	1,00
03	3.1	7702328,815	721713,364	3.1.1	0,50
				3.1.2	1,10
	3.2	7702315,361	721735,549	3.2.1	0,50
				3.2.2	1,20
04	4.1	7702306,934	721739,847	4.1.1	0,50
				4.1.2	1,00
	4.2	7702300,315	721752,658	4.2.1	0,50
				4.2.2	1,00
05	5.1	7702311,062	721720,729	5.1.1	0,50
				5.1.2	1,20
07	7.1	7702291,271	721779,447	7.1.1	1,00
				7.1.2	2,00
	7.2	7702280,66	721774,288	7.2.1	0,50
				7.2.2	1,00

Foram coletadas amostras deformadas de solo nas profundidades previamente determinadas. A profundidade dos furos foi limitada pela dificuldade de se atingir grandes profundidades com o trado utilizado. Após coletadas, as amostras de solo foram devidamente armazenadas em sacos plásticos vedados, para que fosse mantido o teor de umidade natural. A Figura 58 mostra os equipamentos utilizados.



Figura 58: Equipamentos utilizados na campanha de sondagens a trado.

3.5.3 Análise granulométrica

A análise granulométrica das amostras de solo coletadas foi realizada conforme as orientações da NBR 7181 (ABNT, 2016), executando-se uma combinação de sedimentação e peneiramento.

A partir da realização de uma análise tátil-visual, foi identificado que as amostras pertencentes ao mesmo furo apresentavam granulometrias muito próximas entre si, assim foi tomada apenas uma amostra de cada furo para a execução dos ensaios de análise granulométrica, alternando-se as profundidades para furos próximos entre si. Esse comportamento apenas não foi observado no furo 7.1, com as duas amostras sendo utilizadas nos ensaios. Esse procedimento teve como objetivo obter uma descrição representativa dos solos que compõem toda a área estudada.

Após a preparação das amostras para a execução do ensaio, foram tomados 70,0 gramas de material de cada amostra para a etapa de sedimentação, além de aproximadamente 100,0 gramas para determinação do teor de umidade, conforme recomendado pela NBR 6457 (ABNT, 2016).

O material tomado para a sedimentação foi transferido para um béquer e misturado a uma solução de hexametáfosfato de sódio, mantendo-se a mistura em repouso por aproximadamente 12 horas. Transferiu-se então a mistura para o copo dispersor, sendo efetuada a dispersão do material por 15 minutos. Esse procedimento é ilustrado na Figura 59.



Figura 59: Material tomado para sedimentação, mantido em repouso em solução de hexametáfosfato de sódio.

A dispersão foi então transferida para uma proveta graduada, onde foram efetuadas as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação de 0,5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 25 h, sendo medida a temperatura da dispersão em cada leitura. Após ser efetuada a última leitura, o material foi lavado na peneira de 0,075 mm, empregando-se água potável à baixa pressão. A Figura 60 ilustra o material nas provetas para leitura do densímetro.



Figura 60: Material transferido para a proveta, para a execução das leituras do densímetro.

Para a execução do peneiramento fino, o material retido na peneira de 0,075 mm foi seco em estufa a 105°C até a constância de massa. Com o auxílio de um agitador mecânico, o material foi peneirado nas seguintes aberturas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm, e 0,75 mm. Após o peneiramento, as massas retidas acumuladas em cada etapa foram devidamente registradas.

Para a obtenção das curvas granulométricas das amostras ensaiadas, também foi executada a determinação da massa específica dos grãos de solo, de acordo com as determinações da NBR 6458 (ABNT, 2016).

Após a preparação das amostras para a execução do ensaio, foram tomados 70,0 gramas de material de cada amostra, que após ser dispersado foi transferido para um picnômetro. Após a aplicação de vácuo na solução contida no picnômetro e adição de água destilada, foi determinada a massa do conjunto picnômetro + solo + água, sendo medida a temperatura da mistura para a obtenção da curva de calibração.

Esse procedimento foi realizado duas vezes para cada amostra, sendo tomado como resultado final o valor médio das duas determinações. Esse procedimento é ilustrado na Figura 61.



Figura 61: Dispersão de solo transferida para o picnômetro, para determinação da massa específica dos sólidos.

4 Resultados e discussões

Inicialmente nessa seção serão apresentados separadamente os resultados obtidos por cada método aplicado durante a campanha de investigações geofísicas, destacando-se as principais feições identificadas em cada método, assim como os resultados obtidos nas investigações diretas. Por fim, serão apresentadas as interpretações integradas de todos os resultados obtidos, destacando-se as características geotécnicas da área de estudo que foram interpretadas a partir desses resultados.

4.1 Eletorresistividade

As seções 2D de resistividade elétrica obtidas para as linhas de investigação paralelas ao eixo do maciço da barragem (L01 a L05) são apresentadas na Figura 62, enquanto as seções obtidas para as linhas paralelas ao canal extravasor (L06 a L08) são apresentadas na Figura 63.

O posicionamento de cada linha está em destaque na imagem aérea de referência apresentada em cada figura, para melhor orientação. Nas seções de resistividade, as letras “A” e “B” representam, respectivamente, os pontos inicial e final de cada linha, conforme especificado na metodologia do presente trabalho.

Para as linhas L01 a L05, a região correspondente à posição da seção do vertedouro da barragem (que foi interceptado pelas cinco linhas) está marcada com o símbolo “VERT” na Figura 62. Ressalta-se que nessa região não foram coletados dados de eletorresistividade, e que os valores de resistividade correspondentes à seção do vertedouro foram gerados durante o processo de inversão dos dados, não sendo, portanto, considerados nas interpretações dos resultados. Na seção correspondente à linha L06, está marcada também a posição do nível d’água, obtida a partir do modelo hidrogeológico consultado.

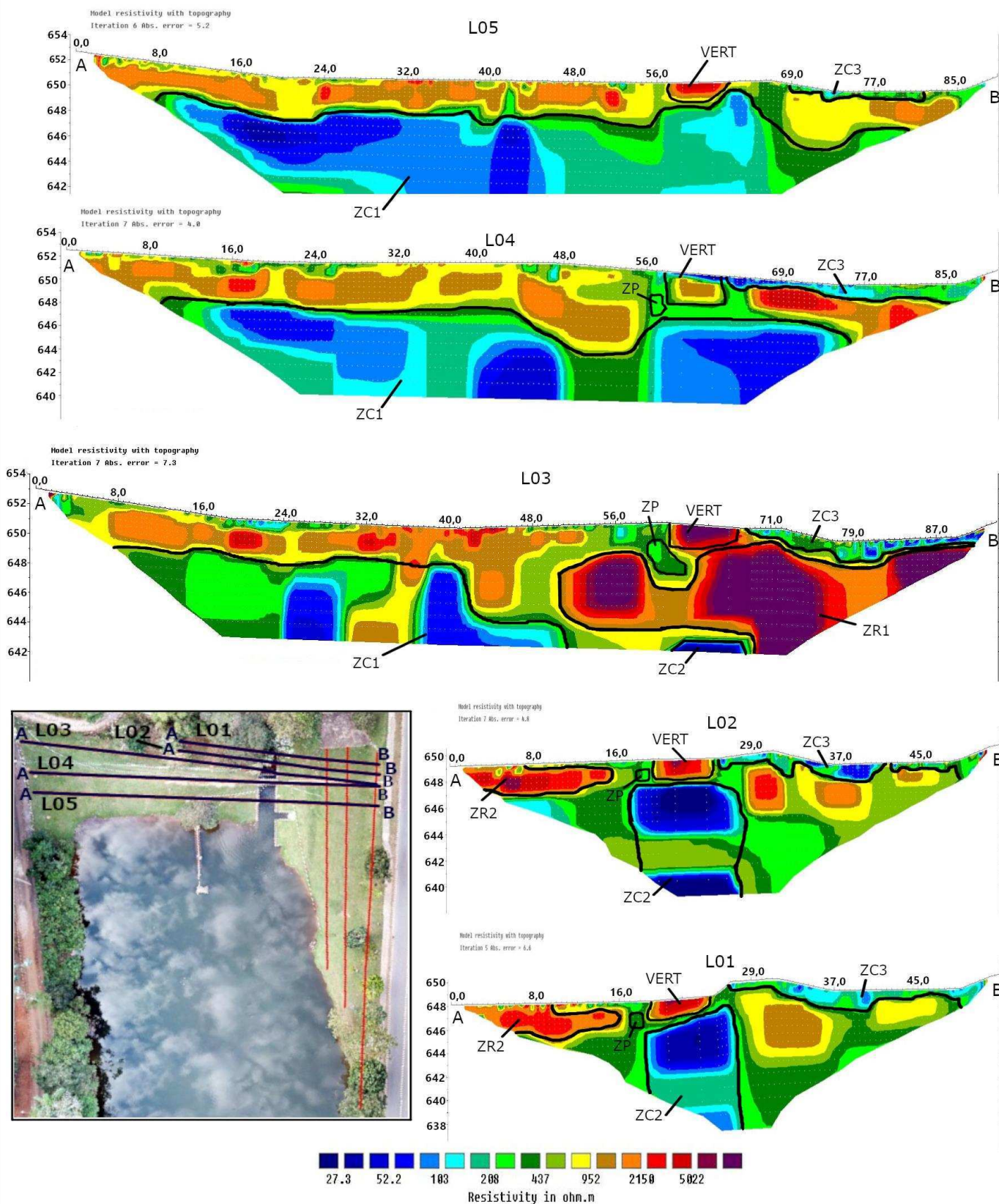


Figura 62: Seções 2D de resistividade elétrica para as linhas L01 a L05.

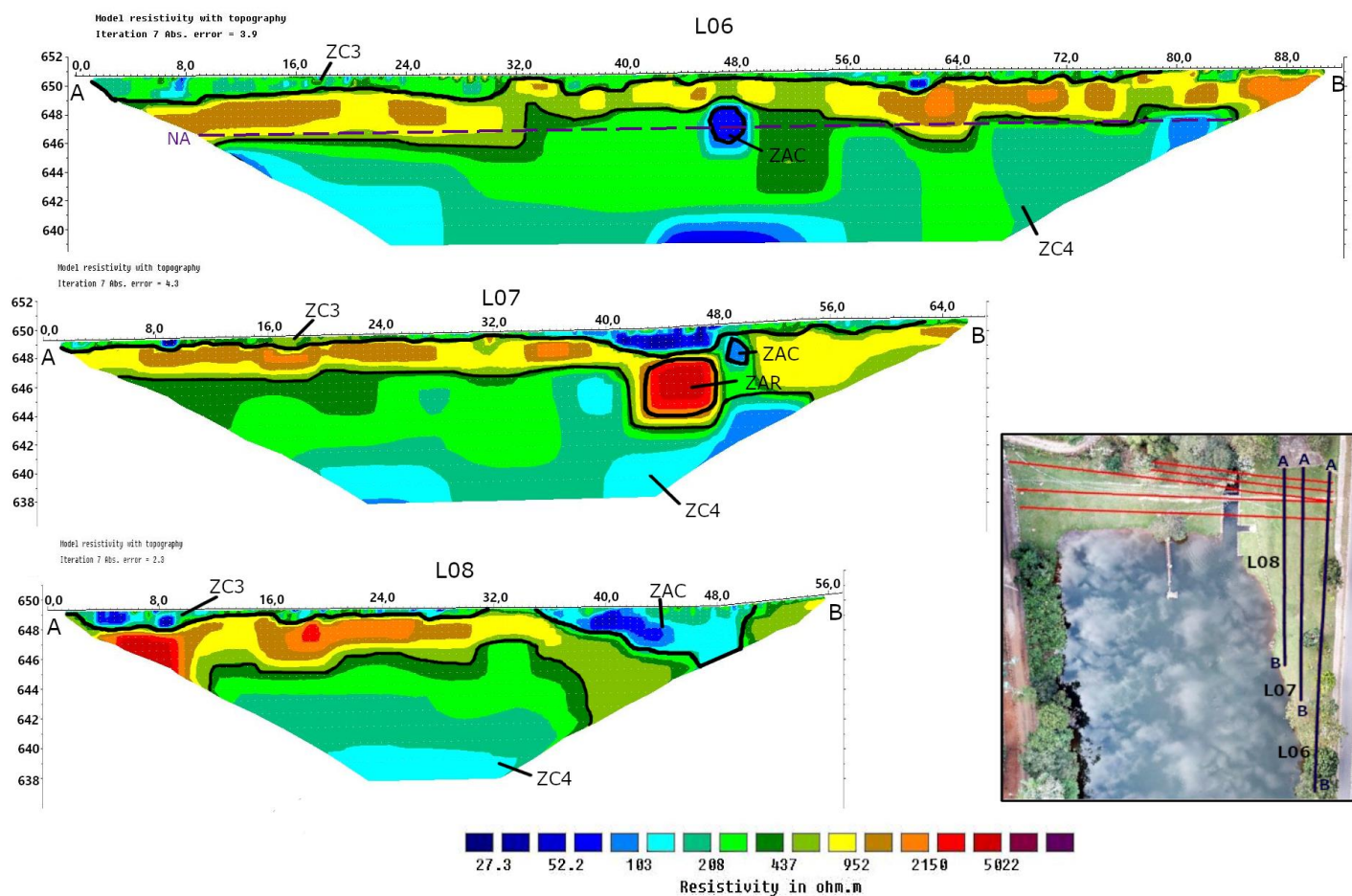


Figura 63: Seções 2D de resistividade elétrica para as linhas L06 a L08.

A partir da análise das Figuras 62 e 63, foram identificadas, inicialmente, três zonas condutivas (ZCs) na região inferior das seções de resistividade. A zona destacada como “ZC1” persiste nas linhas L05, L04 e L03, que correspondem respectivamente ao talude de montante, à crista a o talude de jusante da barragem. Observa-se que o limite superior da ZC1 está em uma posição coerente com o nível d’água no reservatório, marcando, portanto, o limite da zona de saturação no maciço. Interpreta-se, portanto que essa zona condutiva é a região por onde ocorre o fluxo de água em subsuperfície.

A zona destacada como “ZC2” se localiza na região abaixo do vertedouro, persistindo nas linhas L03, L02 e L01 (talude de jusante). Observa-se que a ZC2 também se encontra na zona de saturação do maciço, além de delimitar uma possível região que apresenta concentração de fluxo com maior intensidade em subsuperfície, devido aos baixos valores de resistividade em relação ao seu entorno.

A zona destacada com “ZC4” persiste nas linhas L06, L07 e L08, que correspondem à margem do reservatório. Observa-se que o limite superior dessa zona condutiva está em posição coerente com o nível d’água indicado na seção correspondente à linha L06, marcando o limite da zona de saturação na margem do reservatório.

Também foi identificada uma zona condutiva rasa, com aproximadamente um metro de profundidade, destacada como “ZC3”, que persiste nas oito linhas de investigação e se localiza na região correspondente ao canal extravasor da barragem. Os baixos valores de resistividade da ZC3 são explicados pela infiltração da água superficial que percorre o extravasor em períodos de chuva intensa, como foi o caso dos dias anteriores à aquisição de dados.

Observa-se a presença de duas zonas resistivas (ZRs) no talude de jusante do maciço. A primeira delas está localizada na linha L03 (destacada como “ZR1”), se estendendo por uma grande região abaixo do vertedouro e do extravasor. A segunda persiste nas linhas L01 e L02, na porção inicial dessas duas linhas (destacada como “ZR2”), e se caracteriza por ser uma zona superficial e de menor extensão.

É identificada, nas linhas L04 a L01, uma zona de pequena extensão, próxima à seção do vertedouro, com valores baixos de resistividade em relação ao seu entorno (destacada como “ZP”). O posicionamento da ZP é coerente com a região onde foi identificado a cavidade erosiva no talude de jusante, devido ao processo de piping, porém é necessária a coleta de uma maior quantidade de dados diretos para se determinar se os baixos valores de resistividade indicam que esse processo continua ocorrendo ao longo do maciço.

Percebe-se também a existência de uma zona anomalmente condutiva (destacada como “ZAC”) que persiste nas três linhas da margem do reservatório, além de uma zona anomalmente resistiva (destacada como “ZAR”) presente na linha L07. Essas duas anomalias provavelmente não se relacionam com nenhuma das zonas até então destacadas, não sendo possível interpretar os fenômenos que provocaram a sua presença analisando-se apenas as seções de eletrorresistividade.

Por fim, observa-se uma grande variação lateral nos valores de resistividade nas regiões que não foram destacadas nas seções, o que pode refletir a heterogeneidade dos materiais que compõem a área de estudo. Esse comportamento

é esperado, dado o processo construtivo da estrutura analisada e a grande sensibilidade lateral do arranjo de eletrodos utilizado na coleta dos dados.

4.2 Potencial espontâneo

A vista aérea da barragem estudada mostrando a distribuição em área dos valores de potencial espontâneo é mostrada na Figura 64.

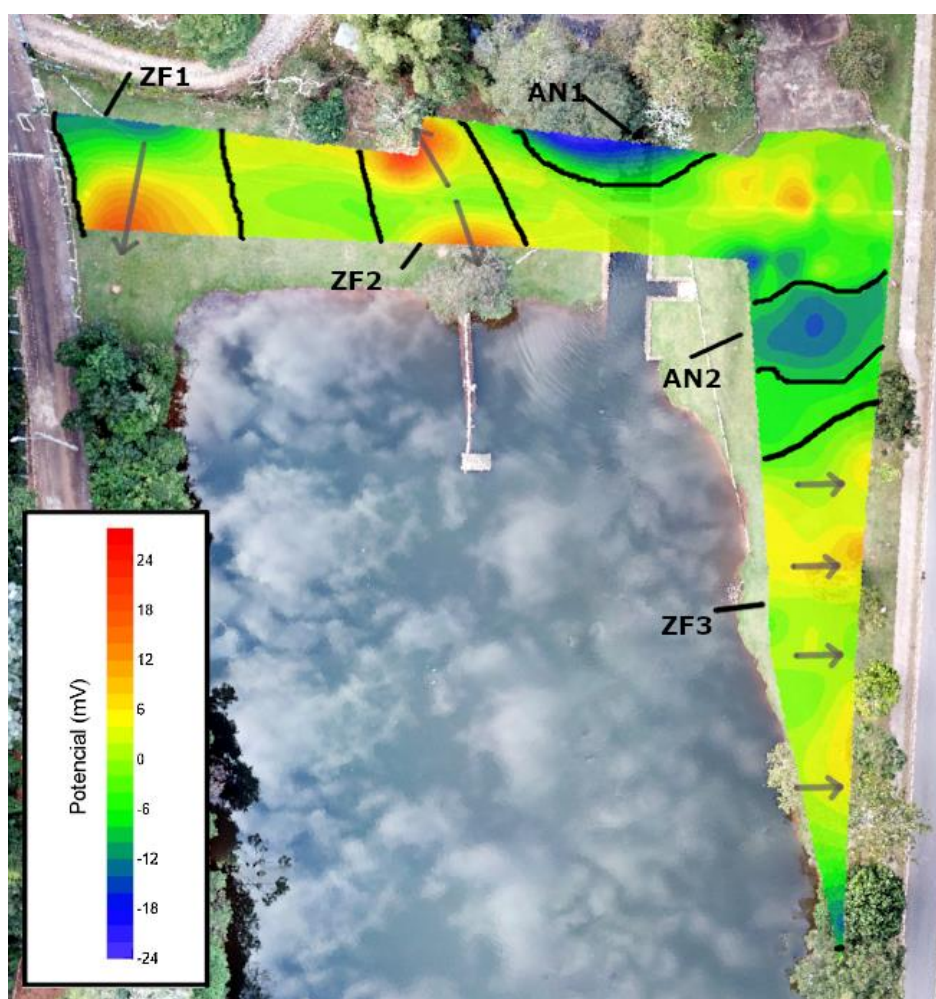


Figura 64: Distribuição dos valores de potencial espontâneo ao longo da área estudada.

É possível identificar a presença de duas zonas de fluxo (ZFs) subsuperficial de baixa profundidade, que não se relacionam ao fluxo principal que ocorre em profundidade através do maciço. A primeira corresponde à porção inicial das linhas L03, L04 e L05 (destacada como “ZF1”), e provavelmente representa uma zona de

recarga da água para o reservatório. A segunda é interceptada pelas linhas L01 a L05 (identificada como “ZF2”), e provavelmente indica a existência de um fluxo de baixa profundidade através dos taludes de montante e jusante, que foi causado pelas chuvas intensas que ocorreram à época da aquisição dos dados.

Nessas zonas, a configuração de potencial é compatível com o processo de eletrofiltração, no qual os cátions presentes na subsuperfície são carregados na direção do fluxo da água, aumentando os valores de potencial à jusante. Além disso, as direções inferidas para o fluxo, indicadas pelas setas na Figura 64, são coerentes com o relevo na região das ZFs, com as áreas de cota mais elevada apresentando menor potencial.

Também foi identificada uma zona de fluxo subsuperficial em profundidade, ao longo da margem do reservatório (destacada como “ZF3”). A presença dessa zona de fluxo é atribuída ao bombeamento de água pelo poço de captação, já que a aquisição dos dados de potencial espontâneo foi realizada durante o seu período de funcionamento. Observa-se que na ZF3 os valores de potencial aumentam na direção do poço, com as direções de fluxo sendo coerentes com aquelas obtidas pelo modelo hidrogeológico consultado.

Observa-se a presença de duas anomalias de potencial negativo (ANs) ao longo da área estudada. A primeira localiza-se no talude de jusante, sendo interceptada pelas linhas L01, L02 e L03 (destacada como “AN1”). Considerando-se que o fluxo de água no interior do maciço ocorre na direção perpendicular ao seu eixo, essa anomalia indica que nessa região ocorreu um processo intenso de carreamento de cátions, que pode ter sido causado por uma concentração de fluxo ou infiltração de água.

A segunda anomalia se localiza na margem do reservatório, sendo interceptada pelas linhas L06, L07 e L08 (destacada como “AN2”), com os resultados do levantamento de potencial espontâneo não sendo suficientes para se inferir a origem dessa anomalia.

4.3 GPR

Os radargramas obtidos para as linhas de investigação paralelas ao eixo do maciço (L01 a L05) e para as linhas paralelas ao canal extravasor (L06 a L08), são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 65 e 66.

O posicionamento das linhas está em destaque na imagem aérea de referência apresentada em cada Figura, com os pontos “A” e “B” representando, respectivamente, o início e o final de cada linha.

Devido à presença do vertedouro, como destacado na seção de Materiais e Métodos, as linhas paralelas ao eixo da barragem foram divididas em dois radargramas, com o espaço entre as duas seções de cada linha representando a posição do vertedouro. Ressalta-se ainda que houve uma falha no equipamento durante a aquisição de dados na linha L04 (crista da barragem), por isso os resultados referentes a essa linha foram descartados e ela não será apresentada.

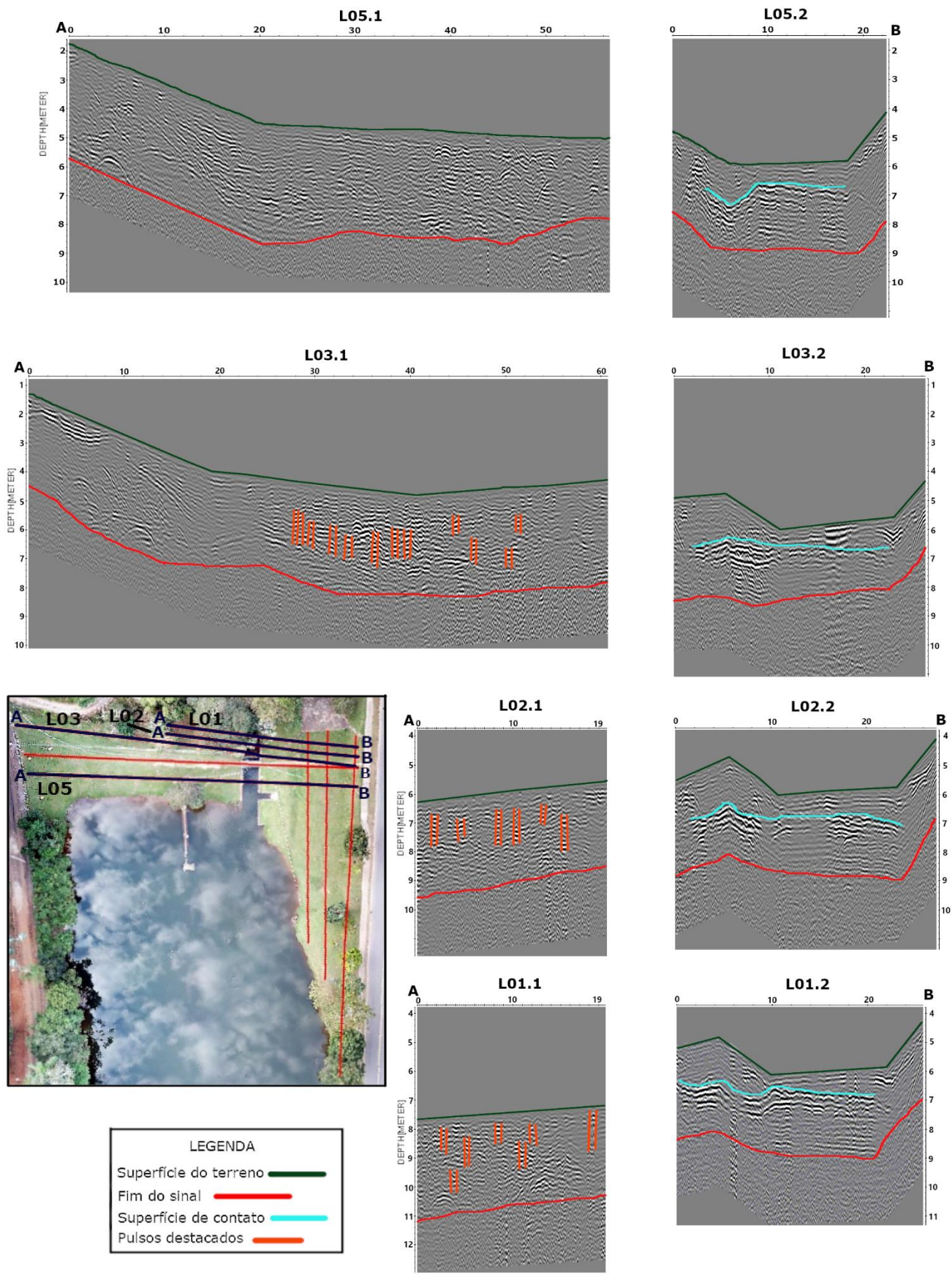


Figura 65: Radargramas referentes às linhas L01 a L05.

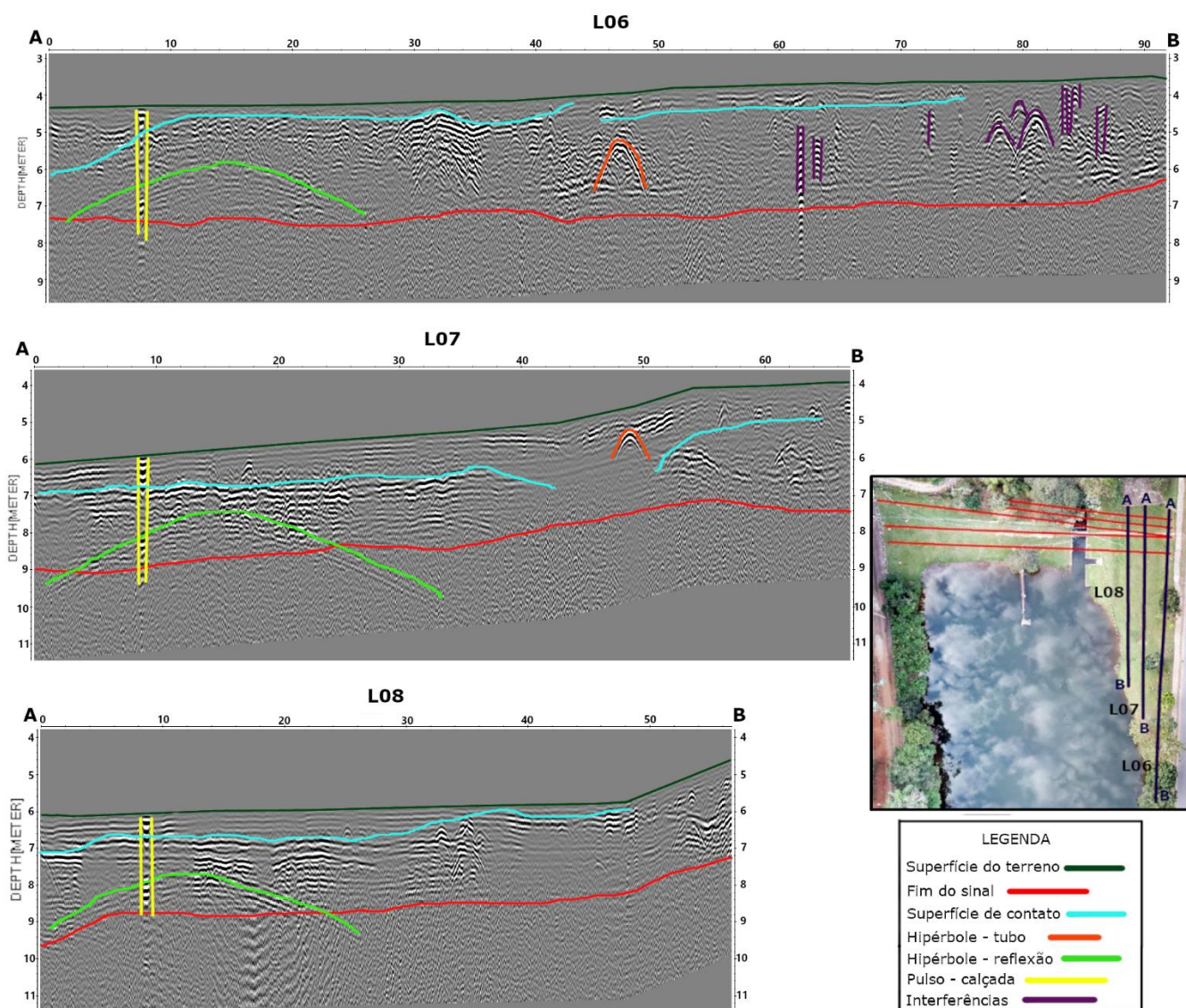


Figura 66: Radargramas referentes às linhas L06 a L08.

A superfície destacada em verde escuro nos radargramas indica a superfície do terreno e o início do sinal das ondas eletromagnéticas, enquanto a superfície destacada em vermelho indica o fim do sinal das ondas EM (diminuição da razão sinal/ruído), sendo que nas profundidades abaixo dessa linha não é possível interpretar os dados obtidos.

A partir da análise das Figuras 65 e 66, foi identificada inicialmente uma superfície de contato entre dois materiais com propriedades elétricas distintas, que persiste em todas as sete linhas, na região correspondente ao canal extravasor da

barragem (destacada em azul claro). Esse contato pode ser inferido pela diferença na amplitude do sinal das ondas EM acima e abaixo da superfície destacada, que separa uma camada superficial, de aproximadamente 1 metro de profundidade, e uma camada mais profunda, que se estende até a perda do sinal das ondas EM. A Figura 67 mostra em detalhe a presença desse contato nas linhas L02.2 e L07.

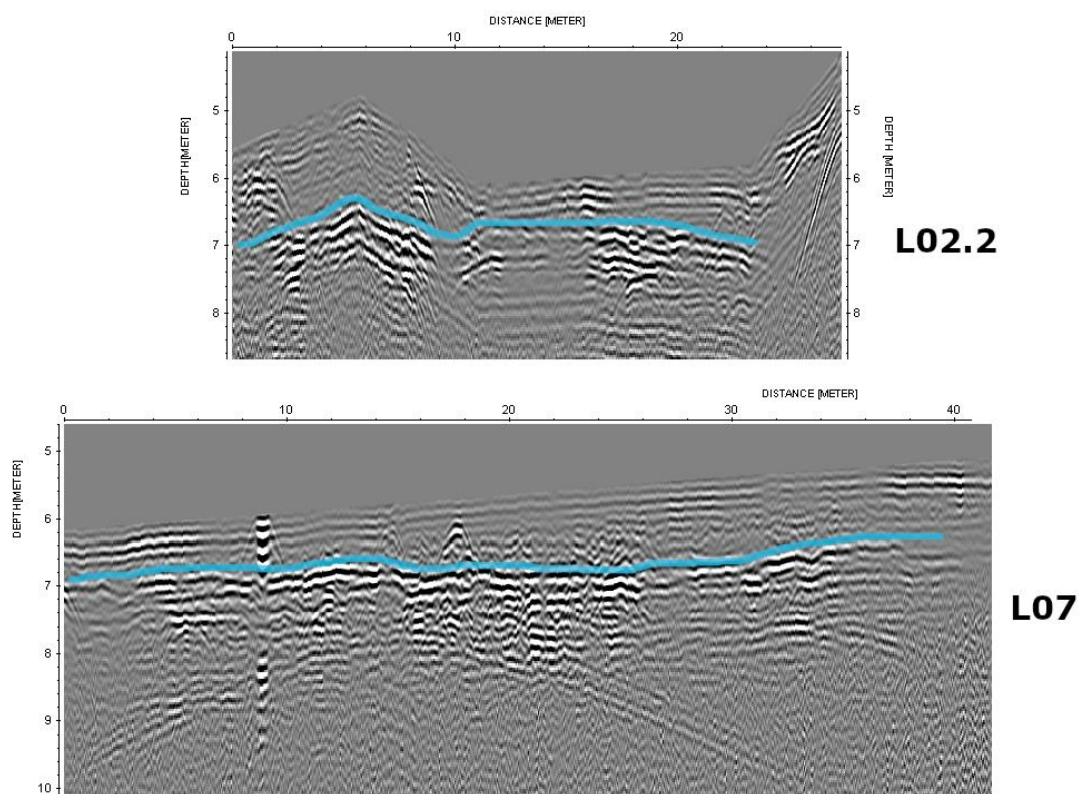


Figura 67: Detalhe da superfície de contato identificada.

Nos radargramas L03.1, L02.1 e L01.1 (talude de jusante) observou-se a presença de diversos pulsos de ondas EM, destacados na cor laranja, que se caracterizam por possuírem grande amplitude e pouca extensão lateral, e foram interpretados como indicativo da presença de vazios na subsuperfície do talude. A Figura 68 mostra em detalhe a presença desses pulsos nas linhas L02.2 e L01.2.

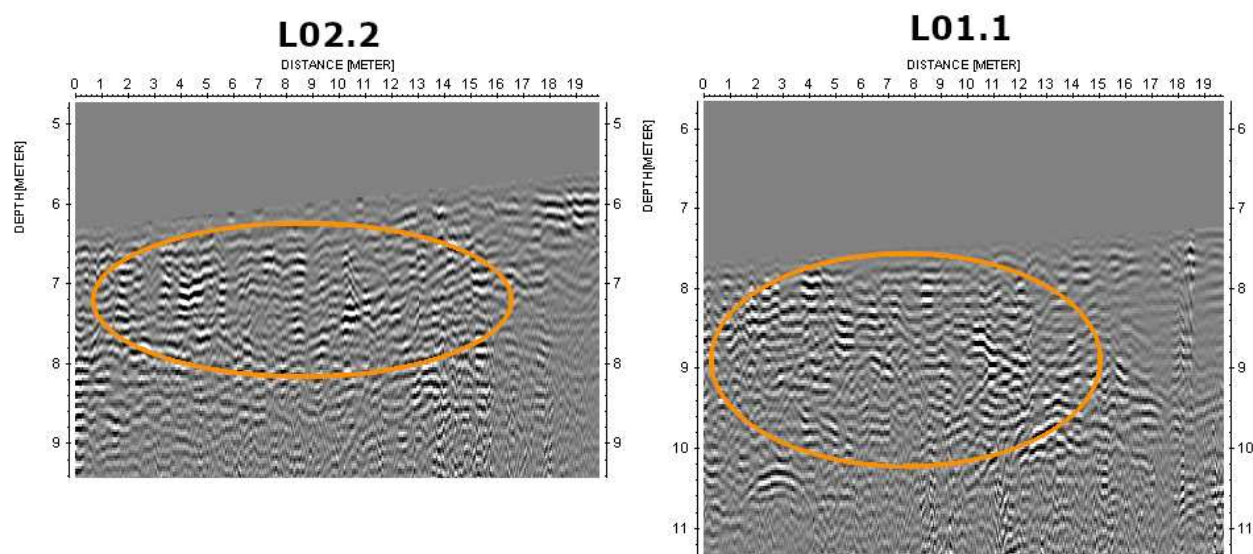


Figura 68: Detalhe dos pulsos destacados.

Também foi interpretada a possível presença de dois objetos enterrados na região correspondente ao canal extravasor, que estão representados nos radargramas das linhas L06 a L08 como as hipérboles de reflexão destacadas em verde claro e em laranja. É possível inferir que ambos os objetos possuem orientação aproximadamente perpendicular a essas linhas, já que eles são identificados na mesma posição horizontal nas três seções, no caso da hipérbole verde clara, e nas duas primeiras, no caso da hipérbole laranja.

O pulso destacado pelas linhas amarelas, que se estende desde a superfície até a profundidade onde o sinal é perdido nas linhas L06 a L08, representa uma interferência no sinal causada pelo passeio de concreto localizado na superfície da margem do reservatório, e que foi interceptado perpendicularmente pelas três linhas de investigação. Outras interferências também foram identificadas na porção final da linha L06, representadas pelos pulsos e as hipérboles destacadas em roxo, que podem ter relação com a grande quantidade de árvores com raízes de grande porte e placas de concreto que se encontram nessa região.

4.4 Análise granulométrica

Os resultados obtidos na análise granulométrica, para as nove amostras de solo que foram ensaiadas, são apresentados na Tabela 12. São mostrados os valores obtidos, em cada amostra, para a massa específica dos sólidos (γ_s), e para as porcentagens das frações argila, silte e areia.

Ressalta-se que a seleção das amostras a serem ensaiadas se deu através da realização prévia de uma análise tátil visual em todas as amostras coletadas, conforme descrito na seção de Materiais e Métodos.

Tabela 12: Resultados da análise granulométrica das amostras de solo coletadas.

Amostra	Furo	z (m)	γ_s (g/cm ³)	% Argila	% Silte	% Areia
2.1.2	2.1	1,00	2,694	35	23	42
3.1.1	3.1	0,50	2,653	49	16	35
3.2.2	3.2	1,20	2,748	58	11	31
4.1.1	4.1	0,50	2,689	66	7	27
4.2.2	4.2	1,00	2,755	62	10	28
5.1.2	5.1	1,20	2,772	61	9	30
7.1.1	7.1	1,00	2,752	37	25	38
7.1.2	7.1	2,00	2,758	60	34	6
7.2.2	7.2	1,00	2,730	43	26	31

Percebe-se que existe uma grande heterogeneidade na distribuição granulométrica das amostras coletadas, com os teores de argila, silte e areia variando consideravelmente, principalmente entre as amostras localizadas em linhas de investigação distintas. Esse resultado é coerente com o fato de que o maciço da barragem é constituído por um aterro compactado, assim distribuições granulométricas distintas podem refletir a heterogeneidade do solo que constitui a área de empréstimo utilizada, ou ainda indicar que diferentes áreas de empréstimo foram utilizadas na construção da estrutura.

Apesar da heterogeneidade destacada, é identificada uma coerência nas distribuições granulométricas para amostras pertencentes a uma mesma linha de investigação, como no caso dos furos 3.1 e 3.2, assim como nos furos 4.1 e 4.2.

Para as amostras coletadas na região do canal extravasor (linha L07), percebe-se que as duas amostras coletadas na profundidade de um metro possuem composições granulométricas semelhantes entre si, porém a amostra coletada a dois

metros de profundidade possui uma composição sensivelmente discrepante das duas mais rasas. Esse resultado indica a existência de duas camadas com materiais de granulometrias distintas nessa região.

Por fim, os valores obtidos para a massa específica dos sólidos apresentaram pouca variabilidade entre as amostras, não sendo possível interpretar as características geotécnicas da área estudada a partir desses valores.

4.5 Interpretações integradas

4.5.1 Identificação de superfície de contato

A partir da análise conjunta dos resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade e GPR para as oito linhas de investigação, foi identificada uma coerência entre a localização e a extensão da ZC3, nas seções de resistividade, e da superfície destacada em azul claro que delimita um contato entre dois materiais distintos nos radargramas. Um exemplo desse resultado para a linha L01 é mostrado na Figura 69.

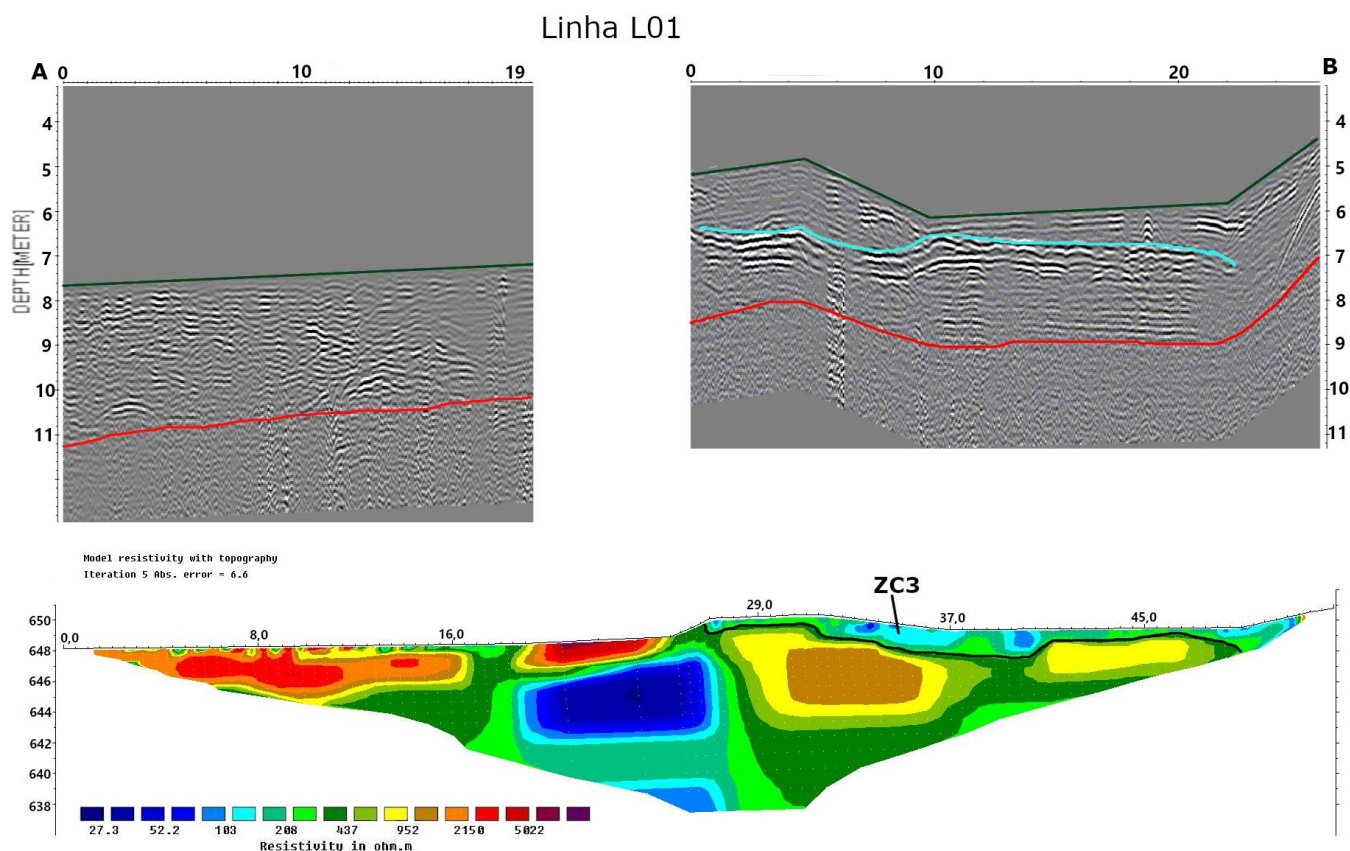


Figura 69: Coerência entre a ZC3 e a superfície de contato do radargrama, para a linha L01.

Assim, pela interpretação integrada entre esses dois métodos, foi possível mapear, na região correspondente ao canal extravasor da barragem, a existência de uma superfície de contato entre dois materiais distintos, a aproximadamente 1 metro de profundidade. Esta superfície delimita na sua parte superior um material com valores mais baixos de resistividade quando comparados à camada subjacente.

Esta interpretação é confirmada pelos resultados obtidos na análise granulométrica, sendo possível identificar, para os furos localizados na linha L07, uma diferença considerável na composição granulométrica das amostras coletadas a 1 metro e 2 metros de profundidade, com a camada mais rasa apresentando um teor menor de partículas finas. A Figura 70 mostra a seção de GPR da linha L07, destacando a localização das amostras de solo coletadas nessa linha, assim como os resultados obtidos para as porcentagens das frações argila, silte e areia nas suas respectivas análises granulométricas.

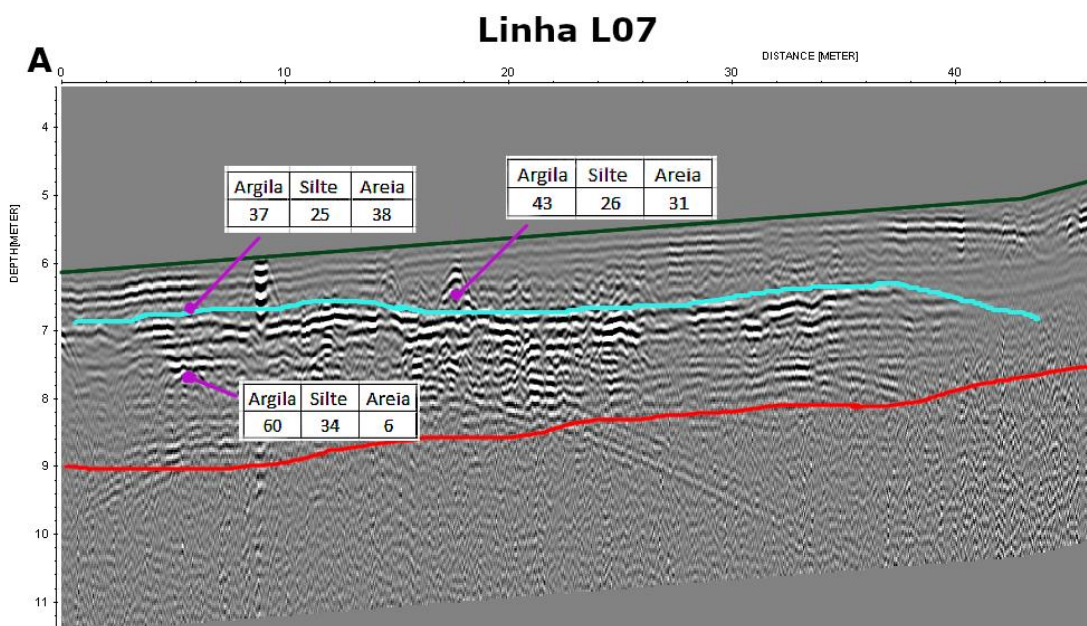


Figura 70: Radargrama da linha L07, indicando a granulometria das amostras de solo coletadas.

A formação da superfície de contato identificada pode ser atribuída à função do canal extravasor de escoar o excesso de água do reservatório em períodos de chuva intensa, impedindo a elevação do nível d'água. Assim, os baixos valores de resistividade elétrica obtidos para a ZC3 podem indicar que essa zona corresponde a uma área de infiltração de água superficial durante os períodos chuvosos, como no caso da época em que os dados foram coletados. Também é possível interpretar que esse processo de infiltração de água provoca um carreamento de partículas finas na camada mais superficial, o que se reflete nos resultados obtidos para a análise granulométrica indicados na Figura 68, com a camada superficial apresentando um teor baixo de solos finos, quando comparada com a camada subjacente.

Um registro do canal de escoamento em funcionamento durante um período chuvoso é mostrado na Figura 71.

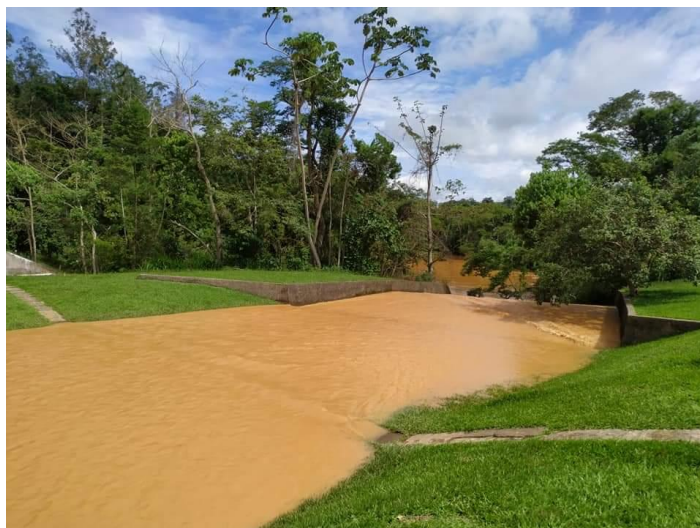


Figura 71: Canal de escoamento em funcionamento durante um período chuvoso.

4.5.2 Identificação de uma estrutura enterrada

A partir dos resultados obtidos nos métodos do potencial espontâneo e GPR para as linhas L06 e L07, foi observada uma correlação entre a AN2, identificada no mapa de distribuição de potencial, e uma das hipérboles de reflexão identificadas nos radargramas. Esse resultado é ilustrado na Figura 72, com a AN2 destacada pela região entre as barras nos gráficos de potencial.

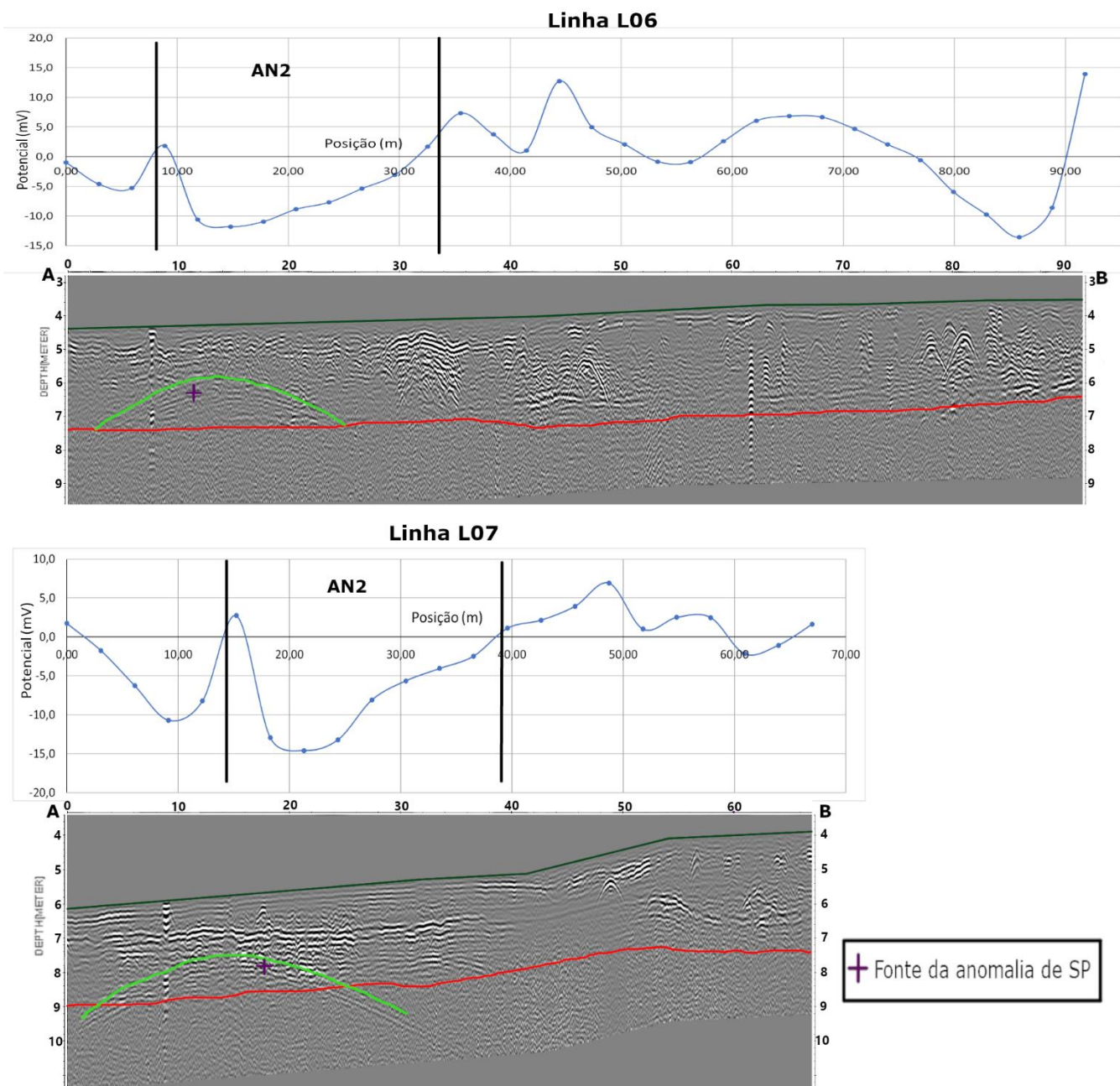


Figura 72: Correlação entre a AN2 e a hipérbole nos radargramas das linhas L06 e L07.

Para os gráficos de potencial dessas duas linhas, foi ainda aplicada a metodologia de Bhattacharya e Roy (1981) para a localização da fonte da anomalia negativa de SP, considerando-se um objeto enterrado com geometria cilíndrica. Os resultados são apresentados na Tabela 13, enquanto a localização da fonte da anomalia é indicada nos radargramas das linhas da Figura 72.

Tabela 13: Resultados da localização da estrutura enterrada.

linha L06				
$ V_{\min} /V_{\max}$	α (°)	d (m)	h (m)	x_0 (m)
6,464	47	5,92	2,02	2,16
linha L07				
$ V_{\min} /V_{\max}$	α (°)	d (m)	h (m)	x_0 (m)
5,370	43	6,09	2,23	2,08

Os resultados obtidos indicam a presença de uma estrutura enterrada na margem do reservatório, identificada pela hipérbole de reflexão destacada na Figura 72. Interpreta-se, ainda, que essa estrutura possui orientação aproximadamente perpendicular às linhas L06 a L08, já que essa hipérbole foi localizada na mesma posição horizontal para os três radargramas.

Os resultados da localização da fonte da anomalia de SP mostraram-se coerentes com a posição da hipérbole destacada nos radargramas, o que corrobora a interpretação dos resultados obtidos por esses dois métodos. A pequena variação na posição da fonte da anomalia entre as linhas L06 e L07 é atribuída à precisão do método gráfico empregado para a sua determinação.

4.5.3 Identificação de uma tubulação subterrânea

Analisando-se os resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade e GPR para as linhas L06 e L07, foi observada uma correlação na localização da ZAC, nas seções de resistividade, com uma das hipérboles destacadas nos nos radargramas. Esse resultado é ilustrado na Figura 73.

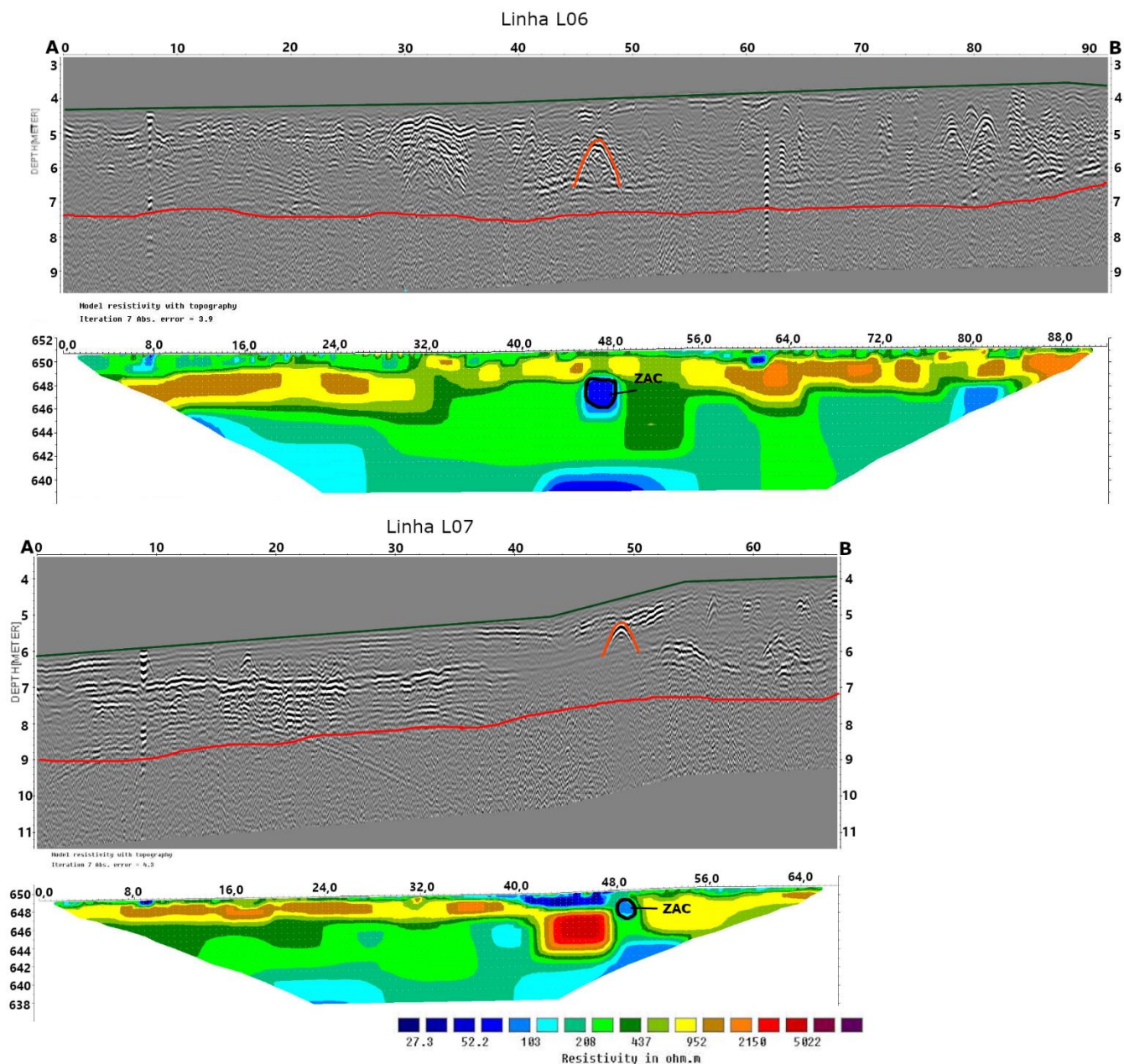


Figura 73: Correlação entre a ZAC e uma hipérbole nos radargramas das linhas L06 e L07.

A identificação dessa hipérbole nos radargramas indica a presença de um objeto enterrado na região do canal extravasor. Além disso as posições horizontais tanto da ZAC quanto da hipérbole destacada coincidem com o ponto na superfície do terreno onde foi identificada a surgência de uma tubulação metálica durante a fase de inspeção visual, sendo possível concluir, portanto, que as anomalias destacadas foram originadas pela presença dessa tubulação.

Destaca-se ainda que a tubulação em questão, cujo registro é apresentado na

Figura 74, aflora na superfície do terreno entre as linhas L07 e L08, e possui orientação aproximadamente perpendicular a essas linhas.



Figura 74: Registro da surgência da tubulação metálica.

Observa-se, pelos valores de resistividade obtidos para a ZAC nas linhas L06 e L07, que essa tubulação transporta água coletada em algum ponto à montante, encontrando-se com sua seção cheia devido às chuvas intensas ocorridas à época da aquisição de dados. Além disso, é possível concluir que a região superficial com baixos valores de resistividade identificada como ZAC na linha L08 representa uma zona de infiltração de água em subsuperfície, devido à descarga deste conduto.

4.5.4 Identificação de zona alterada pela ação de agentes biológicos

Pela análise dos resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade e GPR para as linhas L01 e L02 foi observada uma correlação na localização da ZR2, nas seções de resistividade, e dos pulsos de ondas EM que indicam a presença de vazios em subsuperfície, destacados nos radargramas L02.1 e L01.1. Esse resultado é ilustrado na Figura 75.

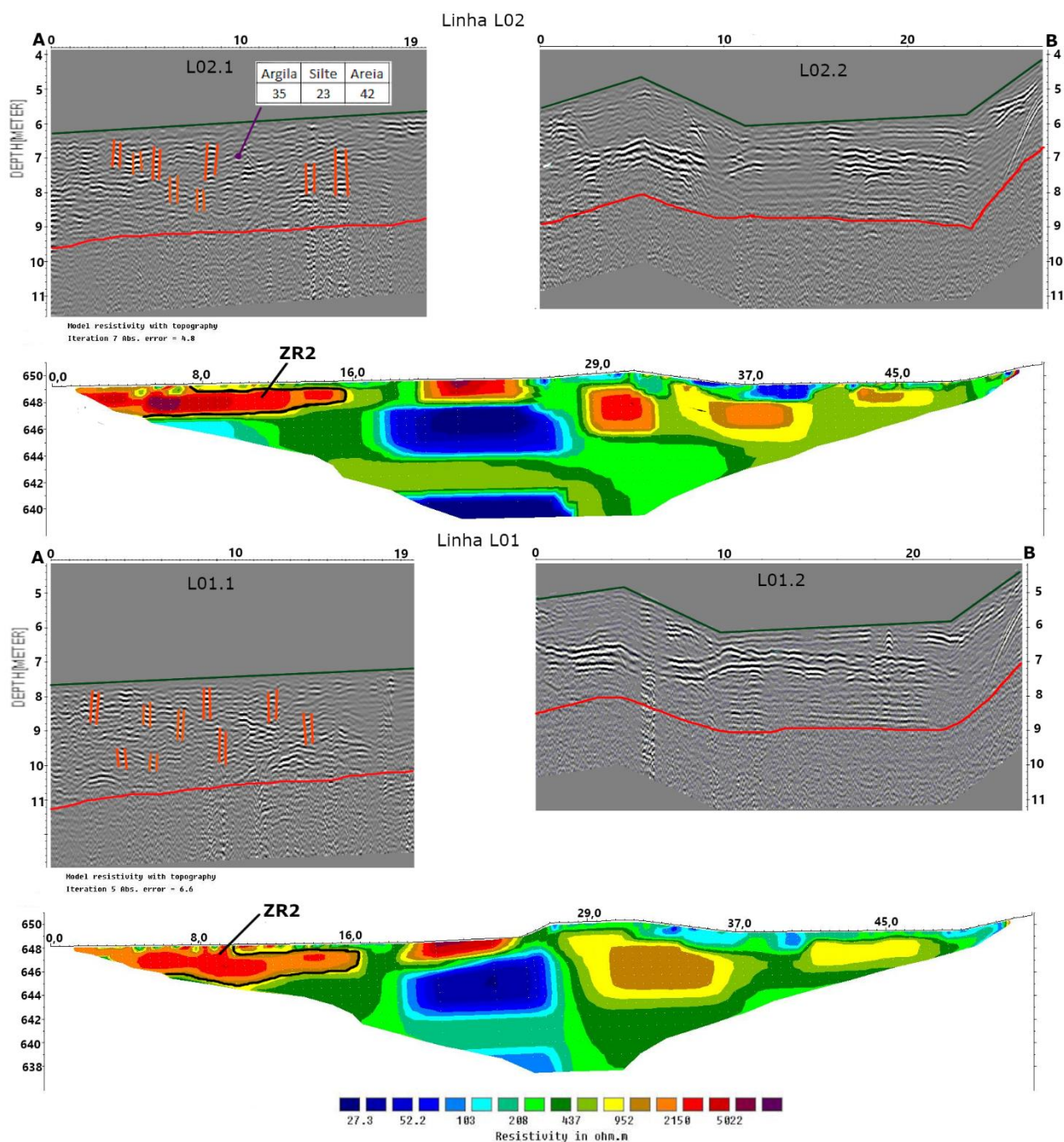


Figura 75: Correlação entre a ZR2 e os pulsos nos radargramas indicando vazios.

A posição da ZR2 e dos pulsos destacados coincide com a localização de um formigueiro que foi identificado na superfície do talude de jusante da barragem durante a fase de inspeção visual. Além disso nessa região existem diversas árvores de grande porte, cujas raízes podem alcançar grandes profundidades.

Assim, é possível interpretar que as propriedades dielétricas do solo superficial da região correspondente à ZR2 se encontram alteradas devido à presença do formigueiro e das árvores identificados, cujo registro é apresentado na Figura 76. Essa alteração ocorre devido à presença de uma maior quantidade de vazios no solo, como produto da ação das raízes das árvores e do desenvolvimento do formigueiro, o que deixa o solo do aterro em um estado mais solto e mal compactado.

A presença de tais vazios provoca o aumento da porosidade do solo, que se reflete nos altos valores de resistividade observados, considerando-se que a massa de solo delimitada pela ZR2 se encontra fora da zona de saturação do maciço. Além disso, os resultados da análise granulométrica da amostra coletada no furo 2.1 (mostrados em termos da porcentagem das frações argila, silte e areia na Figura 75) indicam que o solo dessa região apresenta baixo teor de argila em comparação com as demais amostras, o que corrobora os altos valores de resistividade obtidos, além de indicar que um processo de carreamento de partículas finas pode ter ocorrido no local.



Figura 76: Formigueiro e árvores de grande porte identificados no talude de jusante da barragem.

4.5.5 Correlação entre os resultados dos ensaios SPT e do levantamento de eletrorresistividade

Os resultados dos ensaios SPT realizados na barragem estudada (UFV, 2018; MINETTE, 2015) foram integrados àqueles obtidos no levantamento de eletrorresistividade, a fim de se analisar a correlação entre os dados geofísicos coletados e os dados diretos disponíveis.

A Figura 77 mostra a integração dos resultados dos ensaios SPT, com os furos posicionados nas seções de eletrorresistividade L03 e L04. O N-SPT é mostrado a cada metro, e a profundidade do contato entre a camada de aterro do corpo da barragem e a camada de fundação, identificado em cada furo por meio de análise tátil-visual durante os ensaios SPT, também é indicada.

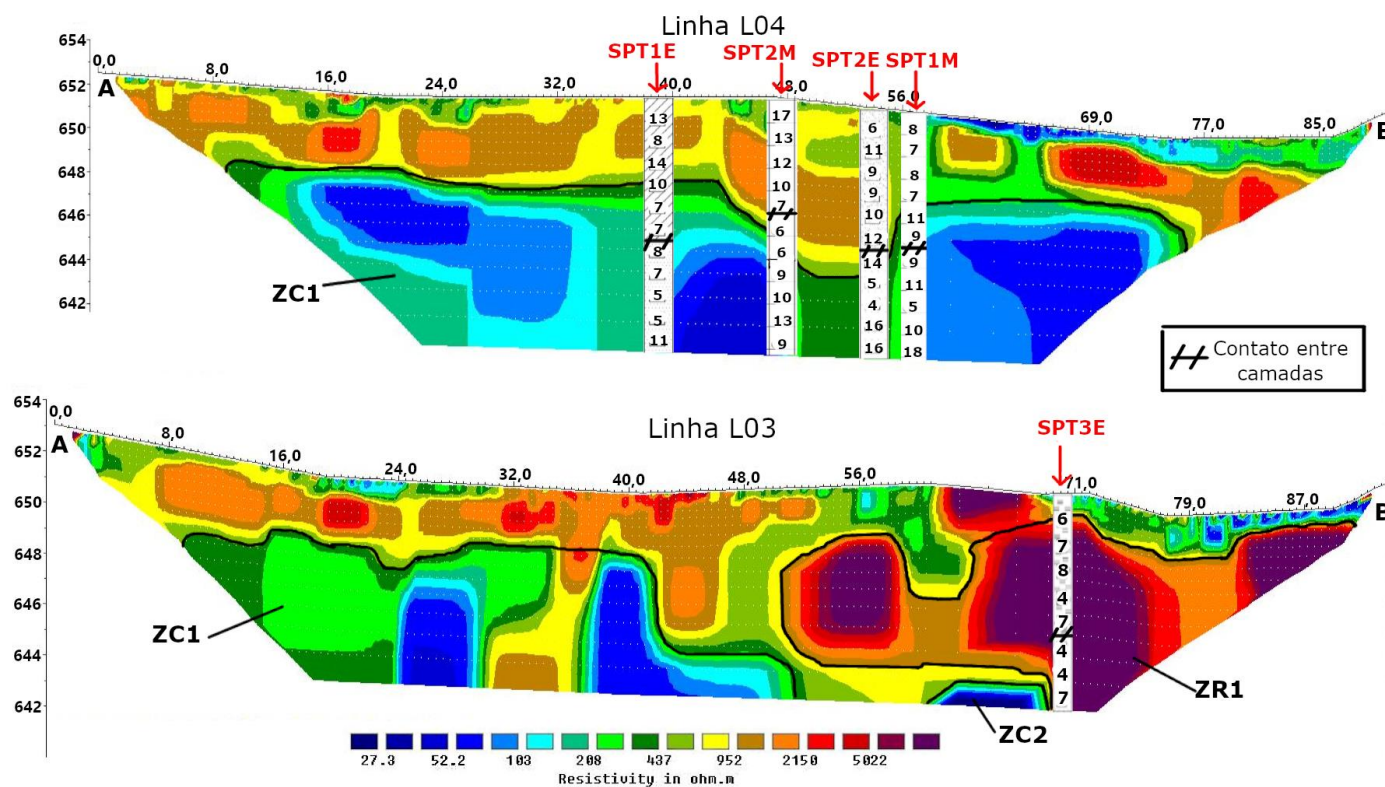


Figura 77: Correlação entre os resultados dos ensaios SPT e do levantamento de eletrorresistividade.

A partir da análise dos resultados dos ensaios SPT na Figura 77, observa-se que a camada do aterro do maciço possui, na crista da barragem (linha L04), uma espessura aproximadamente regular de 6 metros. Além disso, analisando-se as seções de eletrorresistividade, percebe-se que duas zonas condutivas destacadas localizam-se predominantemente na camada de fundação.

Como foi inferido que a ZC1 delimita a zona de saturação da barragem, enquanto a ZC2 representa uma possível zona de fluxo preferencial, é possível indicar que o fluxo de água subsuperficial na barragem estudada ocorre principalmente através da sua camada de fundação.

Para a avaliação da correlação entre os dados geofísicos adquiridos e os dados diretos disponíveis, foram tomados os valores de N-SPT e de resistividade elétrica, a cada metro nos cinco furos de sondagem analisados, na camada de aterro. Estes dados são apresentados na Tabela 14, juntamente com a identificação do tipo de solo perfurado, obtida através da execução de análise tátil-visual.

Tabela 14: Valores de N-SPT e eletrorresistividade, para a camada de aterro.

Furo	Z (m)	Solo	N - SPT (golpes)	ρ (Ω .m)	Furo	Z (m)	Solo	N - SPT (golpes)	ρ (Ω .m)
1E	1	A	13	995,8	3E	2	C	7	9931,0
1E	2	A	8	1042,3	3E	3	C	8	13388,0
1E	3	A	14	824,1	3E	4	C	4	13639,0
1E	4	A	10	422,0	3E	5	C	7	13825,0
1E	5	A	7	204,6	1M	1	D	8	389,6
1E	6	A	7	163,6	1M	2	D	7	350,9
2E	1	B	6	558,0	1M	3	D	8	334,6
2E	2	B	11	448,5	1M	4	D	7	322,5
2E	3	B	9	859,6	1M	5	D	11	285,6
2E	4	B	9	1197,1	2M	1	E	17	938,4
2E	5	B	10	1196,0	2M	2	E	13	905,4
2E	6	B	12	1152,6	2M	3	E	12	1467,3
3E	1	C	6	309,6	2M	4	E	10	1509,2
Descrição									
A	Argila areno-siltosa micácea								
B	Areia silto-argilosa micácea								
C	Silte argiloso micáceo								
D	Silte arenoso, com mica								
E	Argila siltosa, com mica								

Os resultados obtidos para o modelo de correlação gerado são apresentados na Figura 78, na forma de um gráfico no qual os valores de resistividade elétrica são plotados como uma função dos valores de N-SPT.

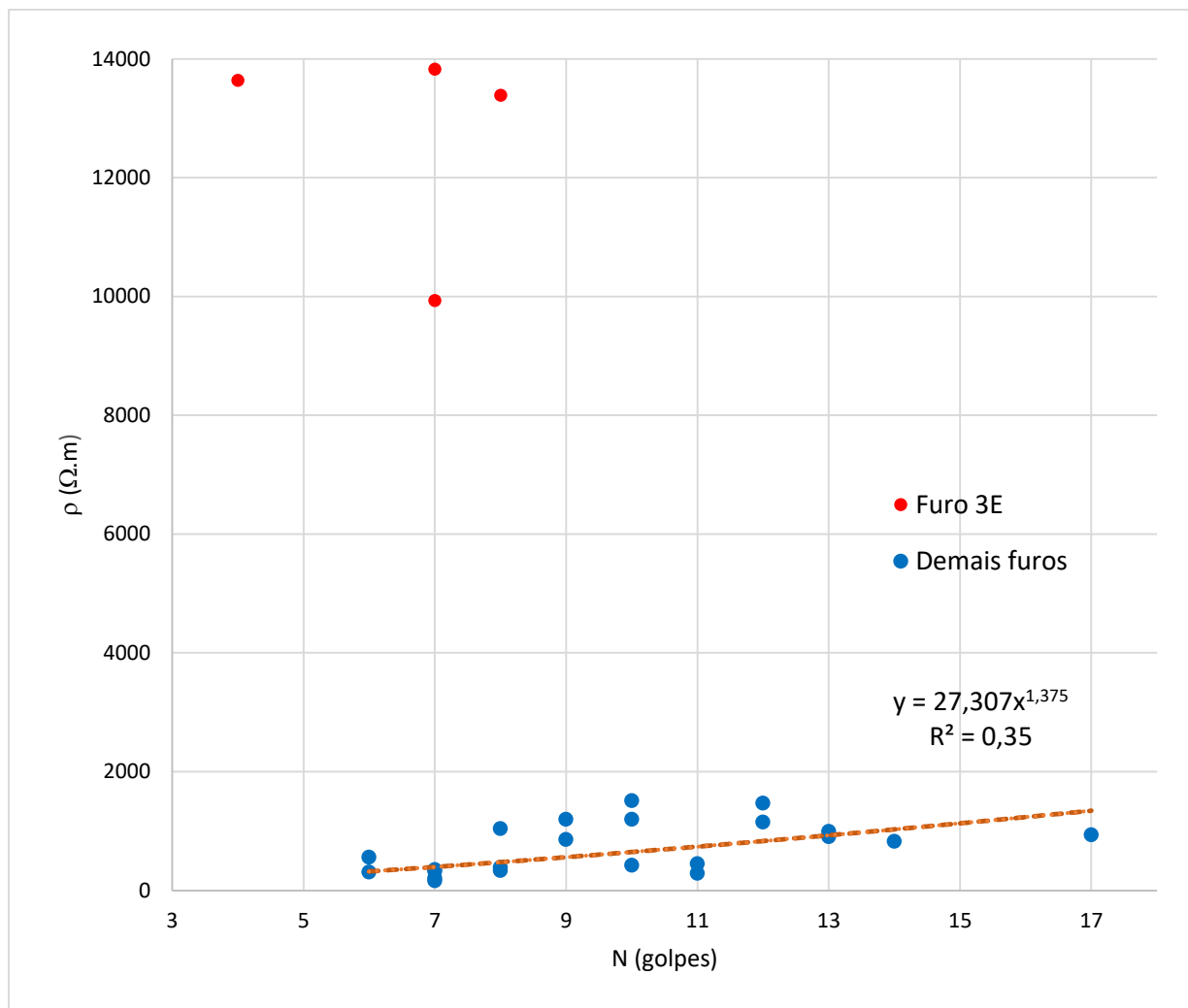


Figura 78: Resultados do modelo de correlação entre os valores de N-SPT e resistividade elétrica, para a camada de aterro.

A partir da análise do gráfico da Figura 78, observa-se que os pontos marcados em vermelho pertencem ao furo 3E, nas profundidades de 2 a 5 metros. Tais pontos se caracterizam por possuir altos valores de resistividade e baixos valores de N-SPT, configuração semelhante àquela obtida por Oh e Sun (2008), sendo associada a um solo no estado solto e com alto índice de vazios, o que está em conformidade com o fato de que o ar apresenta resistividade elétrica muito maior do que as partículas sólidas do solo.

Observa-se também que o furo 3E localiza-se na região destacada como ZR1 na seção de resistividade da linha L03 (Figura 77). Assim, interpreta-se que esta zona resistiva delimita uma região do talude de jusante que apresenta o solo em um estado pouco compactado, em decorrência do processo construtivo do maciço ou de um

possível processo de carreamento de partículas finas. Os altos valores de resistividade observados nessa zona são associados, portanto, ao alto índice de vazios apresentado pelo solo do maciço.

Para o modelo de correlação dos valores de N-SPT e resistividade elétrica na camada de aterro, excluindo-se da análise os pontos destacados em vermelho no gráfico da Figura 76, foi obtida a seguinte equação:

$$\rho = 27,307N^{1,375} \quad (9)$$

A equação obtida indica uma tendência de aumento do valor da resistividade elétrica do solo com o aumento do valor da sua resistência à penetração. Esse resultado está em conformidade com os obtidos na bibliografia, e reflete o fato de que a corrente elétrica se propaga através dos poros da estrutura da massa de solo. Assim, solos mais rígidos, que tendem a apresentar menores índices de vazios e, portanto, poros menos interconectados, oferecem maior resistência à propagação de correntes elétricas.

O valor obtido para o coeficiente de determinação R^2 foi de 0,35, que é sensivelmente mais baixo do que aqueles encontrados na bibliografia. Esse resultado indica um baixo grau de correlação entre as grandezas analisadas, que se justifica pela grande heterogeneidade na composição do solo do aterro do maciço, como destacado na Tabela 14, assim como por uma possível variação nos valores de resistividade da região estudada ao longo do grande intervalo de tempo decorrido entre a realização dos ensaios SPT e o levantamento de eletrorresistividade.

4.5.6 Identificação de zona de fluxo intenso

A partir dos resultados obtidos pelos métodos da eletrorresistividade e potencial espontâneo para as linhas L01, L02 e L03, foi observada uma correlação na localização da ZC2, nas seções de resistividade, e da AN1, identificada no mapa de distribuição de potencial. Esse resultado é ilustrado na Figura 79, com a AN1 destacada pela região entre as barras nos gráficos de potencial.

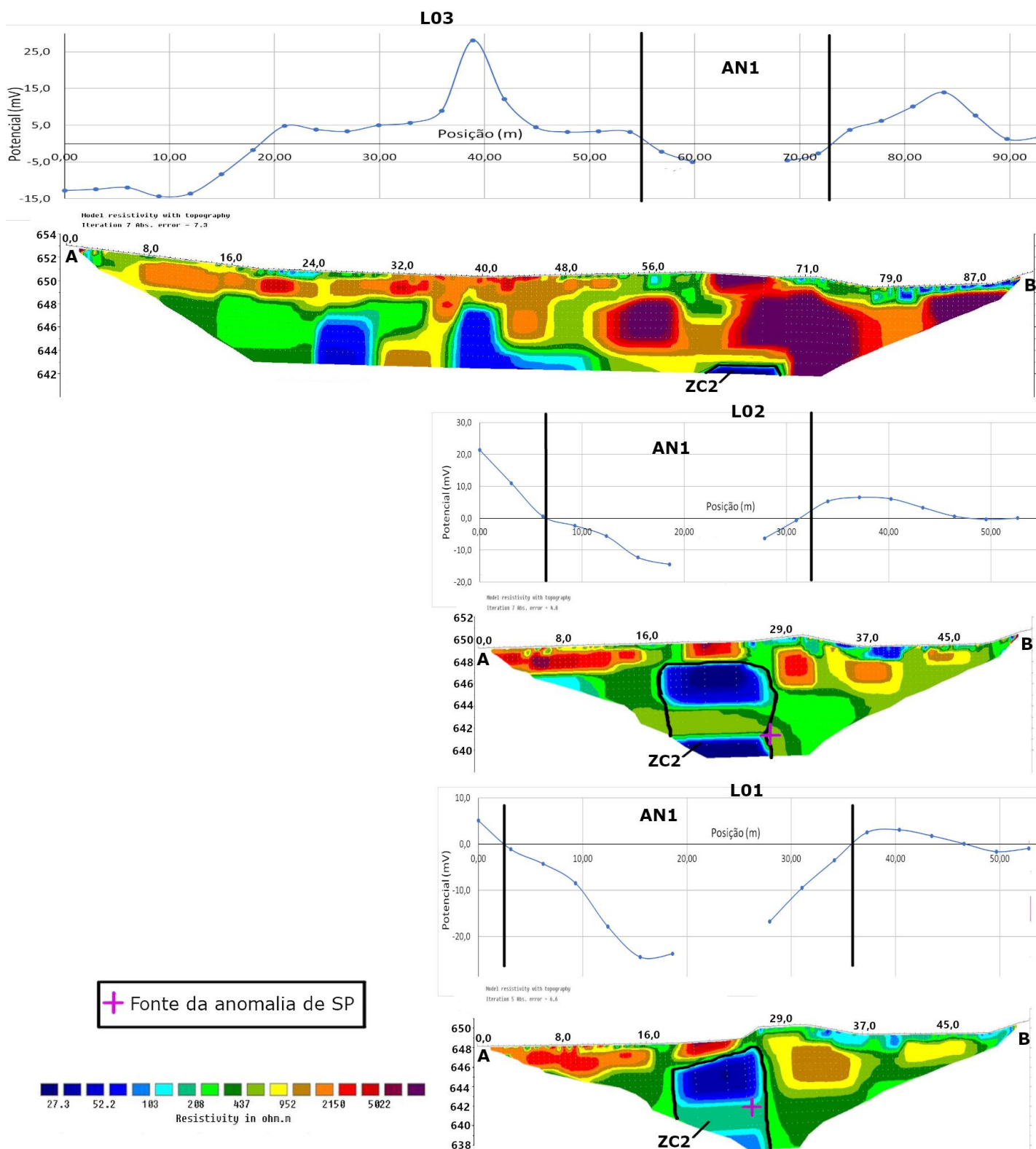


Figura 79: Correlação entre a ZC2 e a AN1.

Percebe-se que a ZC2 apresenta valores muito baixos de resistividade, quando comparada ao seu entorno. Considerando-se que o fluxo de água no interior da barragem ocorre na direção perpendicular ao seu eixo, é possível interpretar que o fluxo subsuperficial de água ocorre preferencialmente ao longo da região abaixo do vertedouro da barragem, que corresponde à localização desta zona condutiva.

Além disso, a presença da anomalia negativa de potencial nessa região indica a ocorrência de um processo intenso de eletrofiltração, possivelmente gerado por uma concentração de fluxo, o que reforça a interpretação da ZC2.

Para os gráficos de potencial das linhas L02 e L01, foi aplicada ainda a metodologia proposta por Bhattacharya e Roy (1981) para se estimar localização da fonte da anomalia de SP. Os resultados são apresentados na Tabela 15, enquanto a localização da fonte da anomalia é indicada nas seções de resistividade das linhas da Figura 79. Observa-se que, apesar dessa metodologia ter sido desenvolvida para a localização de objetos enterrados, os resultados mostram que a fonte da anomalia de potencial se localiza na região delimitada pela ZC2.

Tabela 15: Resultados da localização da fonte da anomalia AN1.

linha L01				
$ V_{\text{mín}} /V_{\text{máx}}$	α (°)	d (m)	h (m)	x0 (m)
7,938	51	24,84	7,82	9,65
linha L02				
$ V_{\text{mín}} /V_{\text{máx}}$	α (°)	d (m)	h (m)	x0 (m)
2,205	22	18,57	8,61	3,48

Assim, a partir da convergência dos resultados obtidos, define-se uma região crítica, na camada de fundação do maciço, com a existência de fluxo concentrado, cuja ocorrência deve ser investigada cuidadosamente em trabalhos futuros. Observa-se também que os efeitos do possível processo de fluxo intenso limitavam-se, até o levantamento dos dados geofísicos utilizados no presente trabalho, à área correspondente ao talude de jusante, uma vez que a AN1 não foi identificada nos dados das linhas à montante.

5 Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos, é possível concluir que a metodologia de aplicação de investigações geofísicas, proposta no presente trabalho, mostrou-se eficaz na avaliação das características geotécnicas e das condições de fluxo da barragem estudada, atendendo aos objetivos propostos.

A análise integrada dos dados obtidos pelos diversos métodos geofísicos com os dados diretos se mostrou importante e eficaz para a obtenção de interpretações melhor embasadas e mais precisas dos resultados apresentados, complementando e confirmando as hipóteses criadas, tendo por vezes permitido também o descarte de algumas outras que não foram confirmadas pela superposição das informações. Além disso, a coleta de informações nas mesmas seções por meio de métodos geofísicos distintos proporcionou a redundância de dados necessária para amenizar possíveis ambiguidades de interpretação.

Quanto à avaliação das condições de segurança da barragem, foram identificadas três regiões problemáticas, que merecem atenção em estudos futuros.

A região localizada abaixo do vertedouro, na camada de fundação, se encontra em situação de fluxo concentrado, identificado pelos resultados do presente trabalho.

As porções do talude de jusante da camada de aterro mapeadas como zonas resistivas (ZR1 e ZR2) se encontram em um estado mal compactado, além de apresentarem baixo teor de partículas finas. Um agravamento na alteração dessas duas regiões pode, portanto, comprometer a estabilidade do corpo da barragem no futuro.

Foram também obtidos resultados que dependem da aquisição de dados diretos para a confirmação de suas interpretações, os quais sugere-se como conteúdo para pesquisas futuras. Destaca-se a observação da zona condutiva nas seções de eletrorresistividade, que pode indicar a ocorrência de piping no mesmo local onde esse fenômeno foi anteriormente relatado, assim como a presença da estrutura enterrada identificada pelas seções de GPR e pela distribuição de potencial espontâneo, na região do canal extravasor.

Além disso, pela falta de superposição com resultados de outros métodos, não foi possível interpretar o fenômeno responsável pela detecção da zona anormalmente resistiva (ZAR) na seção de resistividade elétrica da linha L07.

Por fim, recomenda-se para os trabalhos futuros visando a avaliação da segurança da barragem estudada, uma nova aplicação dos levantamentos geofísicos utilizados no presente trabalho, executando-se um monitoramento da estrutura ao longo do tempo, afim de se acompanhar a evolução dos fenômenos identificados. Além disso, a coleta de uma quantidade maior de dados geotécnicos diretos, simultaneamente aos levantamentos geofísicos, pode levar à obtenção de interpretações ainda mais precisas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS**. Brasília: Engecorps Engenharia S.A., 2012. 111 p. Disponível em:<http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia Prático de Pequenas Barragens - Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens**. Volume VIII. Brasília/DF. 2016. 120 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de engenharia**. São Paulo/SP. 1998. 587 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro/RJ. 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro/RJ. 2016. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro/RJ. 2016. 12 p.

AVILA-DIAZ, A., et al. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 92. n. 2. 2020. 19 p.

BABU, H. V. R., RAO, D. A. A rapid graphical method for the interpretation of the self-potential anomaly over a two-dimensional inclined sheet of finite depth extent. **Geophysics**. v. 53. n. 8. p. 1126-1128. 1988.

BHATTACHARYA, B. B., ROY, N. A note on the use of a nomogram for Self-Potential anomalies. **Geophysical Prospecting**. n. 29. p. 102-107. 1981.

BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo – SP, 2002.

CASAGRANDE, A. Liquefaction and cyclic deformation of sands - a critical review. **Harvard Soil Mechanics Series nº 88**. Harvard University, Cambridge, Massachusetts, EUA. 55 p. 1976.

CONDÉ, V. F. **Predição de umidade e atributos físicos do solo com uso de GPR (Ground Penetrating Radar)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG, 2018.

CORWIN, R. F. The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications. **Investigations in Geophysics**. p. 127-146. 1990.

COURA, M. M. **Aplicação de métodos geoeletricos para análise da estabilidade de barragens de terra**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Rio Claro – SP. 2019.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 2ª edição. São Paulo/SP. Editora Oficina de textos. 2004, 648 p.

DALMASCHIO, C. F., BARBOSA, C. V., SILVA, N. F. **Estudo da aplicação de injeção de cimento em barragem assente sobre solo aluvionar**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa-MG, 2019.

DOU, Q. et al. Real Time Hyperbolae Recognition and Fitting in GPR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 55. p. 51-62. 2017.

DRAHOR, M. G. Application of the Self-potential Method to Archaeological Prospection: some Case Histories. **Archaeological Prospection**. n. 11. p. 77-105. 2004.

FARIA, A. C. S. **AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA INTERAÇÃO LAGOA - AQUÍFERO E DA QUALIDADE DA ÁGUA NO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG. 2017.

FELL, R.; FRY, J. J. **Internal Erosion of Dams and their Foundations**. Editora Taylor e Francis. 2007. p. 1 – 23.

FERREIRA, Q. C. G., BACELLAR, L. A. P., VIANA, J. H. M. Evaluation of soil moisture by electrical resistivity in Oxisols of the central Brazilian savana. **Geoderma Regional**. v. 26. 2021.

FIGUEIREDO, R. Aplicações geofísicas em águas subterrâneas. **Boletim SBGF**. n. 102. p 20-24. 2017.

GALLAS, J. D. F. O método do potencial espontâneo (SP) – Uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Revista Brasileira de Geofísica**. n. 23, p. 133-144. 2005.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo – SP. 2007.

GANDOLFO, O. C. B., GALLAS, J. D. F. Eletroresistividade 3d – Uma avaliação preliminar da técnica. **Revista Brasileira de Geofísica**. n. 23, p. 191-198. 2005.

HATTA, K. A., OSMAN, S. B. A. S. Correlation of Electrical Resistivity and SPT-N value from Standard Penetration Test (SPT) of Sandy Soil. **Applied Mechanics and Materials**. v. 785, p. 702-706. 2015.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo/SP. Editora Oficina de textos. 2009, 429 p.

KUTZNER, C. **EARTH AND ROCKFILL DAMS – Principles of design and construction**. Rotterdam/NL. Editora Taylor & Francis Group. 1997. 352 p.

MINETTE, E. **COMISSÃO NOMEADA PELO ATO 00053/2015/PAD DE 05/06/2015: Relatório técnico**. Viçosa/MG. 2015. 11 p.

MORGENSTERN, N. R., PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**. v. 15, n. 1, p. 79-93. 1965.

MURTY, B. V. S., HARICHARAN, P. Nomogram for the complete interpretation of spontaneous potential profiles over sheet-like and cylindrical two-dimensional sources. **Geophysics**. v. 50. n. 7. p. 1127-1135. 1985.

NETTO, L. G., MALAGUTTI FILHO, W., GANDOLFO, O. C. B. Detection of seepage paths in small earth dams using the self-potential method (SP). **REM - International Engineering Journal**. v. 73. n. 3. p. 303 – 310. 2020.

NOGUEIRA, P. V. **INTEGRAÇÃO DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO E ELETRORRESISTIVIDADE PARA ELABORAÇÃO DE UM MODELO 2D DO DEPÓSITO DE FERRO N4WS DO COMPLEXO SERRA NORTE, CARAJÁS-PA**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UNB. Brasília – DF, 2014.

OH, S., SUN, C.-G. Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. **Environmental Geology**. n. 54, p. 31-42. 2008.

PEREIRA, E. L. **ESTUDO DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO SOB CARREGAMENTO ESTÁTICO**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto - MG, 2005.

PEREIRA, V. C. **COMPARAÇÃO DE DIVERSOS ARRANJOS DE ELETORRESISTIVIDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS**. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Ouro Preto – MG. 2019.

RAFFEK, M. A. B. M. Predicting Standard Penetration Test (SPT-N) Value from Electrical Resistivity Result. Monografia. Universiti Teknologi PETRONAS. Seri Iskandar, Perak, Malásia. 2016.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 2ª edição. West Sussex/RU. Editora John Wiley & Sons. 2011, 696 p.

ROBBINS, B. A., GRIFFITHS, D. V. Internal Erosion of Embankments: A Review and Appraisal. In: ROCKY MOUNTAIN GEO-CONFERENCE, 2018, Golden/EUA. **Proceedings**. Editora ASCE. 2018. p. 61 – 75.

ROCHA, S. F. **IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA INTERAÇÃO LAGO – AQUÍFERO**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG. 2015.

SANTANA, E. V. R., MANIÇOBA, R. P. **Barragem de terra: métodos construtivos e principais modos de ruptura. Uma abordagem bibliográfica**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa-MG, 2019.

TEIXEIRA, W. L. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: Caso do Dique de Sant Lorenç de Montgai – Espanha**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Natal – RN, 2013.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. 2ª edição, Cambridge University Press, United Kingdom. 1990, 770p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. Departamento de Engenharia Agrícola. Estação Climatológica Principal de Viçosa. **Boletim meteorológico 2021**. Viçosa, MG: UFV, 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO - BARRAGEM – UFV**: Relatório técnico. Viçosa/MG. 2018. 20 p.

VARGAS, C. O. Analysis and seismic design of tailings dams and liquefaction assessment. **From Research to Applied Geotechnics**. p. 392-416. 2019.