

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS DE TERRA A PARTIR
DE MÉTODOS SÍSMICOS**

Mariana Duarte Nogueira Freitas

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Rio Claro (SP)
2020

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

MARIANA DUARTE NOGUEIRA FREITAS

ANÁLISE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS DE TERRA A
PARTIR DE MÉTODOS SÍSMICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Rio Claro - SP

2020

F866a Freitas, Mariana Duarte Nogueira
Análise da integridade física de barragens de terra a partir de métodos sísmicos / Mariana Duarte Nogueira Freitas. -- Rio Claro, 2020
98 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Walter Malagutti Filho

1. Barragens. 2. Geofísica. 3. Sísmica de refração. 4. MASW. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARIANA DUARTE NOGUEIRA FREITAS

ANÁLISE DA INTEGRIDADE FÍSICA DE BARRAGENS DE TERRA A PARTIR DE MÉTODOS SÍSMICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Walter Malagutti Filho

João Carlos Dourado

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 21 de maio de 2020.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo nº 2016/18080-9), que financiou o projeto geral de pesquisa “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geoeletricos e sísmicos” e possibilitou a viabilidade econômica para a realização dos campos, além de acesso a novos equipamentos que fizeram essa dissertação possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, com a concessão da bolsa de mestrado no programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da UNESP - Rio Claro.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Walter Malagutti Filho, pela oportunidade, paciência, ensinamentos e dedicação ao projeto.

Ao Prof. Dr. João Carlos Dourado por todo o auxílio, principalmente durante a etapa de processamento dos dados, que me ajudou, com muita paciência, a entender a aplicação dos *softwares*.

Agradeço também ao Prof. Dr. César Augusto Moreira e à equipe do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT por toda ajuda e aprendizado durante os trabalhos de campo.

Finalmente, agradeço aos meus pais, Ana Vera e Luiz, e ao meu namorado, Jorge, por todo o amor, apoio e confiança durante esta jornada, por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade, me incentivando a ser sempre melhor.

Aos amigos Hélio e John por todos os momentos de descontração, principalmente durante a etapa final do trabalho.

RESUMO

Barragens são estruturas construídas ao longo de um rio ou talvegue, com o objetivo de criação de um reservatório para diversas finalidades. Essas estruturas, por represarem grande quantidade de água ou rejeitos, necessitam de construção adequada e constante manutenção, pois podem ocorrer falhas em sua estrutura, ocasionando acidentes de grandes proporções. As principais causas de rupturas de barragens estão associadas a processos de erosão interna (*piping*) ou galgamento (*overtopping*). Portanto, vê-se a necessidade de constante monitoramento dessas estruturas para que seja possível sua garantia de segurança. Neste contexto, os métodos geofísicos são uma alternativa de baixo custo, indireta e rápida para a identificação e caracterização de estruturas com potencial de comprometer a segurança de barramentos e estruturas anexas. O presente trabalho apresenta resultados da aplicação dos métodos sísmicos de refração e análise multicanal de ondas de superfície (MASW) para o estudo de duas barragens de terra localizadas na zona rural dos municípios de Cordeirópolis e Ipeúna, no estado de São Paulo. A barragem de Cordeirópolis é caracterizada por solo laterítico argiloso proveniente da alteração de rochas básicas características da Formação Serra Geral, enquanto a barragem de Ipeúna é caracterizada por solo argilo-arenoso originado da decomposição de rochas do Grupo Itararé. Em cada uma das barragens foram realizados dois diferentes levantamentos de campo. O primeiro com duas linhas sísmicas paralelas ao eixo longitudinal das barragens, com utilização de geofones de frequência 4,5 Hz espaçados 2 metros entre si, e o segundo com apenas uma linha sísmica, utilizando-se geofones de frequência 10 Hz espaçados 1 metro entre si, o que possibilitou a comparação entre diferentes arranjos. Dois *softwares* foram utilizados para análise, edição e interpretação dos dados, o *SeisImager* e o *Rayfract*. No caso dos dados obtidos pelo método da sísmica de refração, os dois *softwares* foram utilizados para sua interpretação, o que possibilitou a confecção de gráficos e seções tomográficas representativos de cada área, nos quais foi possível observar as diferentes velocidades de propagação das ondas sísmicas P, sendo possível a caracterização da estrutura das barragens, com identificação do topo do embasamento, o nível d'água, além de possíveis zonas de infiltração. Além disso, a diferença entre os tipos de processamento de cada um dos *softwares* também foi analisada. Para os dados de MASW, apenas o *software SeisImager* foi utilizado, entretanto este método não apresentou resultados satisfatórios, não sendo possível uma análise confiável dos dados.

Palavras-chave: Barragens. Geofísica. Sísmica de refração. MASW.

ABSTRACT

Dams are structures built along a river or a thalweg, with the objective of creating a reservoir for different purposes. As it's a structure that dam a large amount of water or tailing, require adequate construction and constant maintenance, as flaws in their structure can occur, causing major accidents. The main causes of dam ruptures are associated with piping and overtopping. Therefore, there is a need for constant monitoring of these structures so that it's security guarantee is possible. In this context, geophysical methods are a cheap, indirect and a fast alternative for the identification and characterization of structures with the potential to compromise the safety of dams and attached structures. The presente work presentes results of the application of seismic refraction method and multichannel surface wave analysis (MASW) for the study of two earth dams located in the rural area of Cordeirópolis and Ipeuna, in the state of São Paulo. The Cordeirópolis dam is characterized by lateritic clay soil resulting from the alteration of basic rocks characteristic of Serra Geral Formation, while the Ipeuna da mis characterized by sand-clay soil originated from the decomposition of rocks from Itararé Group. In each of dams, two different field surveys were carried out. The first with two seismic lines parallel to the longitudinal axis of the dams, using 4,5 Hz geophones spaced 2 meters apart, and the second with only one seismic line, using 10 Hz geophones spaced 1 meter apart, which enabled compare different arrangements. Two softwares were used to analyze, edit and interpret the data, SeisImager and Rayfract. In the case of data obtained by the seismic refraction method, the two softwares were used for their interpretation, which made it possible to produce graphs and tomographic sections representative of each área, in which it was possible to observe the different propagation speeds of P seismic waves, making it possible to characterize the structure of the dams, with identification of the top of the basement, the water level, in addition to possible infiltration zones. In addition, the difference between the types of processing of each software was also analyzed. For MASW data, only the SeisImager software was used, however this method did not presente satisfactory results, and a reliable analysis of the data is not possible.

Key-words: Dams. Geophysics. Seismic refraction. MASW.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização das barragens estudadas	17
Figura 2 – (A) Área da barragem de Cordeirópolis; (B) Área da barragem de Ipeúna	18
Figura 3 – Mapa do continente Sul-Americano com a localização da Bacia do Paraná	19
Figura 4 – Mapa geológico local com a localização da barragem de Cordeirópolis	22
Figura 5 – (A) Bloco de basalto encontrado próximo à barragem; (B) Concentração de blocos em vala na região sul da barragem	22
Figura 6 – Mapa geológico local com a localização da barragem de Ipeúna	23
Figura 7 – Afloramento de diamictito próximo à barragem	24
Figura 8 – Barragem de terra homogênea	27
Figura 9 – Barragem de terra zonada	28
Figura 10 – Barragem de enrocamento com núcleo central	28
Figura 11 – Barragem de enrocamento com núcleo inclinado	29
Figura 12 – Barragem de enrocamento com face de concreto	29
Figura 13 – Barragem de enrocamento com chapa de aço	29
Figura 14 – Barragem de concreto de gravidade	30
Figura 15 – Barragem de concreto de gravidade aliviada	30
Figura 16 – Barragem de concreto em contraforte	31
Figura 17 – Barragem de concreto abóboda, apresentando exemplo de arcos simples e múltiplos	31
Figura 18 – Barragem mista (terra/enrocamento)	31
Figura 19 – Barragem de gabião	32
Figura 20 – Barragem de madeira	33
Figura 21 – Mecanismo de formação de <i>piping</i> , a partir de erosão regressiva	35
Figura 22 – Processo de <i>piping</i> causado por trincas existentes na barragem	35
Figura 23 – Movimento de partículas associado à passagem de diferentes tipos de ondas ...	41
Figura 24 – Reflexão e refração sísmicas	44
Figura 25 – Lei de Snell ($V_1 < V_2$)	45
Figura 26 – Refração total	46
Figura 27 – Refração com múltiplas camadas	47
Figura 28 – Esquema de execução da sísmica de refração, com o respectivo sismograma obtido	49
Figura 29 – Princípio fundamental da sísmica de refração	50

Figura 30 – Arranjo de campo para pesquisa MASW	53
Figura 31 – Esquema das etapas do método MASW	54
Figura 32 – Equipamentos utilizados em campo; (A) Sismógrafo SUMMIT X Stream Pro e demais acessórios; (B) martelo sísmico; (C) geofone; (D) representação da linha de aquisição sísmica com geofones	55
Figura 33 – Localização das linhas de aquisição sísmica na barragem de Ipeúna/SP (etapa 1)	56
Figura 34 – Localização das linhas sísmicas na barragem de Cordeirópolis/SP (etapa 1)	57
Figura 35 – Localização da linha sísmica na barragem de Cordeirópolis/SP (etapa 2)	58
Figura 36 – Localização da linha sísmica na barragem de Ipeúna/SP (etapa 2)	58
Figura 37 – Fluxo de etapas a serem realizadas dentro do módulo <i>Pickwin</i> , para a sísmica de refração	60
Figura 38 – Gráfico frequência x velocidade de fase gerado no módulo <i>Pickwin</i> exibindo as amplitudes máximas da área	62
Figura 39 – Gráficos de tempo x distância para a linha 1 obtida na barragem de Cordeirópolis/SP	65
Figura 40 – Seção sísmica da linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP a partir do <i>software SeisImager</i>	65
Figura 41 – Sismograma típico obtido para a linha 1 na barragem de Cordeirópolis/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos)	66
Figura 42 – Conjunto de gráficos tempo x distância dos tiros executados na linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP	67
Figura 43 – Área de cobertura dos raios sísmicos para a linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP	67
Figura 44 – Seção tomográfica obtida para a linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP	68
Figura 45 – Gráficos de tempo x distância obtidos para a área da barragem de Cordeirópolis/SP	69
Figura 46 – Seção sísmica para a barragem de Cordeirópolis/SP a partir do <i>software SeisImager</i>	69
Figura 47 – Sismograma típico obtido para a barragem de Cordeirópolis/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos)	70
Figura 48 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da barragem de Cordeirópolis/SP	71
Figura 49 – Área de cobertura dos raios sísmicos na barragem de Cordeirópolis/SP	71

Figura 50 – Seção tomográfica representante da barragem de Cordeirópolis/SP	72
Figura 51 – Conjunto de gráficos de tempo x distância para a linha 1 obtida na barragem de Ipeúna/SP	73
Figura 52 – Seção sísmica da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP, a partir do <i>software SeisImager</i>	74
Figura 53 – Sismograma típico obtido para a linha 1 da barragem de Ipeúna/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos)	75
Figura 54 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP.....	75
Figura 55 – Área de cobertura dos raios sísmicos na linha 1 da barragem de Ipeúna/SP	76
Figura 56 – Seção tomográfica representante da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP	76
Figura 57 – Conjunto de gráficos de tempo x distância para a barragem de Ipeúna/SP	77
Figura 58 – Seção sísmica da barragem de Ipeúna/SP a partir do <i>software SeisImager</i>	78
Figura 59 – Sismogrma típico obtido para a barragem de Ipeúna/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos)	79
Figura 60 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da barragem de Ipeúna/SP	79
Figura 61 – Área de cobertura dos raios sísmicos na barragem de Ipeúna/SP	80
Figura 62 – Seção tomográfica representante da barragem de Ipeúna/SP a partir do <i>software Rayfract</i>	80
Figura 63 – Resultados de MASW para a barragem de Cordeirópolis. (1) Gráfico velocidade de fase x frequência; (2) curva de dispersão; (3) modelo de distribuição da onda S em relação à profundidade	82
Figura 64 – Resultados de MASW para a barragem de Ipeúna. (1) Gráfico velocidade de fase x frequência; (2) curva de dispersão; (3) modelo de distribuição de onda S em relação à profundidade	83
Figura 65 – Seções de resistividade para a linha 1 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner	85
Figura 66 – Comparação entre os modelos de MASW e sísmica de refração de ondas S para a área de Cordeirópolis	86
Figura 67 – Seções de resistividade para a linha 1 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner	88

Figura 68 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) e seção sísmica (Linha 1, etapa 1) representantes da barragem de Ipeúna, com a localização do vertedouro que liga os dois reservatórios.....	89
Figura 69 – Comparação entre os modelos de MASW e sísmica de refração de ondas S para a área de Ipeúna	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Categorização e principais causas de danos em barragens de terra	36
Tabela 2 – Valores de propagação da onda longitudinal (P) nas rochas	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Apresentação e Justificativas	14
1.2	Objetivos.....	15
2	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	17
2.1	Aspectos Geográficos e Fisiográficos.....	17
2.2	Contexto Geológico	19
2.2.1	Geologia Regional	19
2.2.1.1	Grupo Itararé.....	20
2.2.1.2	Formação Serra Geral	21
2.2.2	Geologia Local	21
3	CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE BARRAGENS	25
3.1	Barragens de Regularização.....	25
3.2	Barragens de Contenção	25
3.3	Tipos de barragens	26
3.3.1	Barragens convencionais	26
3.3.1.1	Barragens de terra	26
3.3.1.2	Barragens de enrocamento.....	28
3.3.1.3	Barragens de concreto.....	29
3.3.1.4	Barragens mistas	31
3.3.2	Barragens não convencionais	32
3.3.2.1	Barragens de gabião.....	32
3.3.2.2	Barragens de madeira.....	32
3.3.2.3	Barragens de alvenaria de pedra	33
3.4	Problemas associados a barragens	33
3.5	Segurança de barragens	36
4	METODOLOGIA	38
4.1	Geofísica aplicada ao estudo de barragens	38
4.2	Métodos Sísmicos.....	39
4.2.1	Tipos de Ondas Sísmicas.....	40
4.2.1.1	Velocidades de propagação das ondas sísmicas em solos e rochas	41

4.2.1.2	Trajetória dos raios sísmicos.....	43
4.2.2	Sísmica de Refração	48
4.2.3	Análise multicanal de ondas de superfície (MASW)	52
5	AQUISIÇÃO DOS DADOS	55
6	PROCESSAMENTO DOS DADOS	59
6.1	<i>Software SeisImager</i>	59
6.1.1	Análise dos dados de refração sísmica	59
6.1.2	Análise de dados de MASW.....	61
6.2	<i>Software Rayfract</i>	62
7	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	64
7.1	Sísmica de Refração.....	64
7.1.1	Barragem de Cordeirópolis.....	64
7.1.1.1	Primeira etapa de campo (fazer uma figura com esquema).....	64
7.1.1.2	Segunda etapa de campo.....	68
7.1.2	Barragem de Ipeúna.....	72
7.1.2.1	Primeira etapa de campo.....	73
7.1.2.2	Segunda etapa de campo.....	77
7.2	Análise multicanal de ondas de superfície (MASW).....	81
7.2.1	Barragem de Cordeirópolis/SP	81
7.2.2	Barragem de Ipeúna.....	82
8	INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES	84
8.1	Barragem de Cordeirópolis	84
8.2	Barragem de Ipeúna	87
9	CONCLUSÕES	91
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Justificativas

As barragens podem ser definidas como obstáculos artificiais construídos transversalmente a um rio ou talvegue, com o objetivo de reter água, ou qualquer outro líquido (rejeitos, detritos), para a formação de um reservatório, o qual pode ser destinado a diversas finalidades, como o controle de cheias, irrigação, geração de energia, navegação, abastecimento urbano e industrial, turismo, controle de rejeitos industriais, entre outros.

Em um passado recente (anos 70 e 80), grande parte dos estudos geotécnicos no âmbito da Engenharia Civil, eram dirigidos, prioritariamente, para o subsídio à construção de grandes obras, tais como grandes barragens, usinas nucleares, estradas, túneis, entre outras. Com o passar dos anos essa tendência foi se modificando e, atualmente, é comum a construção de obras de pequeno porte para atender uma grande diversidade de objetivos. Em relação às barragens, as de terra são o tipo mais comum entre as de pequeno porte (CULLEN, 1964).

Mesmo com os avanços tecnológicos, problemas em relação à estrutura das barragens ainda são frequentes. Segundo Perini (2009), entre 2000 e 2008, foram registrados 140 incidentes apenas no Brasil, grande parte associados a problemas de infiltração e erosão interna (*piping*). Em relação às barragens de terra, muitas vezes essas são construídas por proprietários rurais ou prefeituras de pequenas cidades, que não possuem grandes orçamentos, carecendo, assim, de projetos apropriados.

Desde 2011, quando o primeiro Relatório de Segurança de Barragens foi produzido, até 2017, a Agência Nacional de Águas (ANA) registrou 24 acidentes, além de diversos incidentes (ocorrências que afetam o comportamento ou estrutura da barragem, as quais podem, futuramente, causar acidentes). Dentre os acidentes, um de grande repercussão foi o rompimento da barragem de rejeito da Mineradora Samarco S/A, em Mariana/MG, o qual causou grande impacto ambiental, além da morte de 19 pessoas. Segundo dados da ANA (2017), o colapso ocorreu, provavelmente, devido à liquefação dos efluentes presentes, lançando na drenagem natural cerca de 42 milhões de metros cúbicos de lamas oriundas do beneficiamento do minério de ferro. Os poluentes degradaram a qualidade ambiental de todo o trecho do Rio Doce até sua foz no estado do Espírito Santo em um percurso de mais de 700 km, gerando danos ao consumo humano, fauna, flora, aproveitamento energético e industrial,

agricultura e pecuária. Outro acidente de grandes proporções ocorreu em janeiro de 2019, quando a barragem da mina Córrego do Feijão, pertencente à Vale S/A, em Brumadinho/MG, rompeu e gerou grandes impactos ambientais, além de ter sido considerado o maior acidente de trabalho já registrado no país. O número de vítimas fatais identificadas chegou a 259, além de 11 que continuam desaparecidas ou sem identificação (MACEDO, 2020). Por isso, justifica-se a necessidade do constante monitoramento e manutenção desse tipo de estrutura, a fim de garantir sua integridade e prevenir eventuais acidentes.

Diversos métodos de monitoramento são conhecidos e aplicados, como por exemplo, a inspeção visual periódica dos reservatórios, métodos diretos, como o registro de dados de pluviosidade, vazões afluentes e defluentes, variação do nível d'água, pressão, deslocamentos do maciço e permeabilidade do solo, e os métodos geofísicos que foram escolhidos para este estudo por serem uma alternativa rápida, indireta e de baixo custo para obtenção de informações de subsuperfície, cujos resultados podem ser correlacionados de forma direta com propriedades geotécnicas de interesse no monitoramento de barragens.

O presente projeto dessa dissertação foi vinculado à pesquisa de âmbito maior, relativa ao Processo Fapesp nº 2016/18080-9 intitulada “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geoeletricos e sísmicos”. Nessa dissertação foi desenvolvido um estudo geofísico em duas barragens de terra de pequeno porte, situadas nos municípios paulistas de Cordeirópolis e Ipeúna, através do emprego de métodos sísmicos, por meio das técnicas de sísmica de refração (com aquisição e processamento tomográfico) e análise de dispersão de ondas superficiais, sendo empregada a técnica *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) (PARK et al., 1999).

Além dos métodos sísmicos, a pesquisa geral que justificou o projeto Fapesp, abordou o emprego de diversos métodos geofísicos, como os geoeletricos, através da técnica do imageamento elétrico (com medidas da resistividade e da polarização induzida) com testes de diferentes disposições eletródicas; método geoeletrico do potencial espontâneo; o método geofísico do *Ground Penetrating Radar* – GPR, o que, ao final, possibilitou a correlação de informações obtidas pelos diversos métodos empregados.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi o emprego da sísmica de refração aliado à aquisição e análise de ondas sísmicas superficiais (MASW), para definir parâmetros

geotécnicos, tais como, embasamento, zoneamento da estrutura, espessura e nível d'água, além da identificação de possíveis zonas de infiltrações e/ou percolação de água nos barramentos, o que poderiam comprometer a integridade física das mesmas.

Um objetivo secundário foi a comparação de dois *softwares* (*SeisImager* 2.9.1.9 da OYO Corporation e *Rayfract* 3.35 da Intelligent Resources Inc.) utilizados para leitura processamento e geração das seções tomográficas originadas pelo emprego da sísmica de refração, a fim de observar o comportamento de ambos na geração de informações necessárias para a identificação e interpretação das estruturas presentes nas barragens, em termos de precisão.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

2.1 Aspectos Geográficos e Fisiográficos

As barragens de terra do presente estudo estão localizadas no interior do estado de São Paulo, sendo uma delas localizada na zona rural do município de Cordeirópolis, podendo ser acessada por uma estrada de terra próxima a empresa Karina Pisos e Revestimentos Cerâmicos Ltda., ao lado da Rodovia Washington Luís (SP-316); e a outra localizada na zona rural do município de Ipeúna, dentro do Pesqueiro Quilombo, sendo seu acesso através da Estrada Municipal de Rio Claro – Ipeúna (Figura 1).

Figura 1 – Localização das barragens estudadas.



Fonte: Modificado de Google Maps, 2018.

A escolha dessas barragens baseou-se em alguns critérios, tais como dimensões parecidas (ambas de pequeno porte), diferença entre as litologias que compõem a estrutura dos barramentos e sua base, acessibilidade à área, o que permitiu a realização de diversos ensaios geofísicos de forma semi-continuada.

As duas barragens estão localizadas na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba. A barragem de Cordeirópolis represa um afluente do Ribeirão do Tatu, que cruza a cidade de Limeira e desemboca no Rio Piracicaba. A barragem de Ipeúna represa o Córrego da Fazenda Covitinga, que é um afluente do Ribeirão da Água Vermelha, o qual é um afluente do Rio Corumbataí que por sua vez desemboca no Rio Piracicaba (SILVA, 1999).

Quanto à geomorfologia, a região encontra-se na Depressão Periférica do Estado de São Paulo, a qual se localiza entre terrenos pré-Cambrianos do Planalto Atlântico a Leste, e escarpas das Zonas da Cuesta do Planalto Ocidental a Oeste e Norte. A unidade é descrita em três zonas: Paranapanema, Mogi-Guaçu e Médio Tietê, estando a área de estudo situada na última zona. As principais características morfológicas são o comportamento interplanáltico, suavemente ondulado (SILVA, 1999).

O clima da região é classificado como subtropical úmido, caracterizados por invernos secos, com temperaturas inferiores a 18°C, e verões quentes com temperaturas superiores a 22°C. Em relação a pluviosidade, a média de precipitação de chuva chega a 136 mm, com a concentração de chuvas nos meses de verão, e o período mais seco nos meses de inverno (INMET, 2016).

Em relação ao uso e ocupação do solo, as áreas no entorno da barragem de Cordeirópolis são utilizadas principalmente para o plantio de cana-de-açúcar. Já a área da barragem de Ipeúna, localizada no interior do Pesqueiro Quilombo, é utilizada para lazer e pesca recreativa, além de áreas próximas que são utilizadas para pastagem. As fotografias mostradas na Figura 2 mostram os aspectos gerais de ambas as barragens.

Figura 2 - (A) Área da barragem de Cordeirópolis; (B) Área da barragem de Ipeúna.



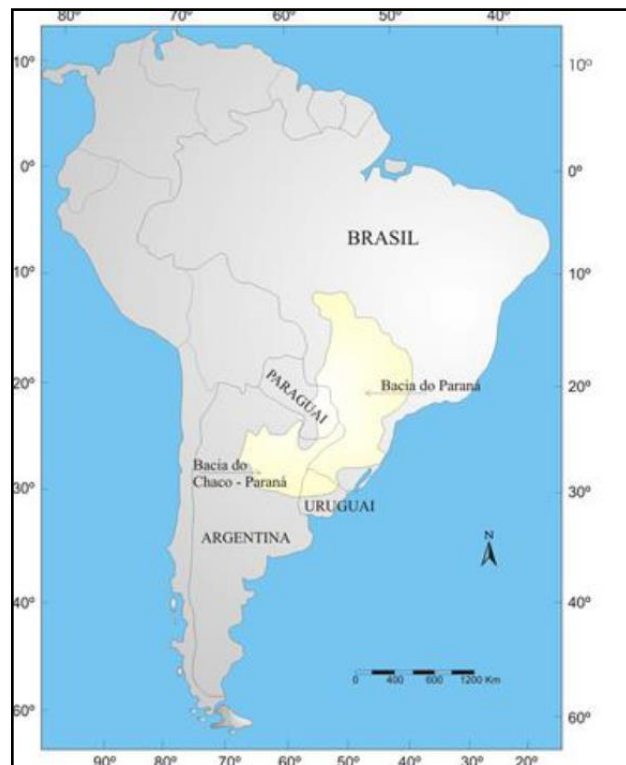
Fonte: Fotos obtidas pela equipe de campo.

2.2 Contexto Geológico

2.2.1 Geologia Regional

Ambas as áreas de estudo, na qual as barragens se situam, estão localizadas na Bacia Sedimentar do Paraná. Trata-se de uma unidade geotectônica do tipo sinéclise intracratônica localizada na parte centro-leste do continente sul-americano. Compreende porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, somando uma área de aproximadamente 1,6 milhões de quilômetros quadrados, possuindo formato ovalado, com seu maior eixo no sentido N-S (Figura 3). No território brasileiro, especificamente, situa-se nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul (MILANI et al., 2007). Seu registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com espessura total máxima em torno de 6000 m (SCHNEIDER et al., 1974; ZAINÉ, 1994).

Figura 3 – Mapa do continente Sul-americano com a localização Bacia do Paraná.



Fonte: Machado (2009)

Milani et al. (1997, 2007) consideram que o registro estratigráfico da bacia se distribui desde o neo-Ordoviciano (± 450 Ma) até o neo-Cretáceo (± 65 Ma), representando um intervalo de cerca de 385 Ma, no qual estão registrados períodos descontínuos de sedimentação limitados por discordâncias regionais. Seu preenchimento é constituído por seis sequências deposicionais de segunda ordem: Sequência Ordovício-Siluriana, Devoniana, Carbonífera-Eotriássica (Gondwana I), as quais são caracterizadas por sucessões sedimentares relacionadas a ciclos marinhos no Paleozóico, Sequência Meso a Neotriássica (Gondwana II) e Neocretácea (Grupo Bauru), estas resultantes de ciclos sedimentares continentais e vulcanismo em escala continental.

O preenchimento sedimentar da referida bacia é constituído por rochas paleozoicas, mesozoicas e cenozoicas desde continentais a marinhas que registram, inclusive, períodos glaciais no Permo-Carbonífero. Durante o Mesozóico, ocorreu um processo de desertificação que deu origem a espessos pacotes de arenitos eólicos. Também chama a atenção o imenso magmatismo ocorrido no Eocretáceo com aproximadamente 1300 m de espessura, os quais, somados às soleiras de diabásio, chegam a 2000 m de rochas ígneas (ZALÁN et al., 1987; SIQUEIRA, 2011).

No caso das rochas aflorantes na área de estudo, elas são de idade permo-Carbonífera a Cretácea, sendo representadas pelas unidades litoestratigráficas Grupo Itararé e Serra Geral.

2.2.1.1 Grupo Itararé

O Grupo Itararé, indiviso no estado de São Paulo, compreende uma sucessão sedimentar de idade Permo-Carbonífera, cujos depósitos são caracterizados por conglomerados, siltitos, ritmitos, lamitos, diamictitos, alguns verdadeiros tilitos e arenitos, os quais podem conter estruturas sin-sedimentares, como estratificações cruzadas acanaladas, *hummocky*, tangencial à base, clinoascendentes e também mega ondulações ou clastos. Seus diferentes ambientes deposicionais podem ser desde o continental fluvial, lacustre, até o marinho (PERINOTTO, 2008). Na porção central da bacia, a espessura deste grupo pode superar 1000 metros, se adelgçando em direção às bordas norte e sul (FRANÇA; POTTER, 1988).

No estado de São Paulo, o Grupo Itararé é representado principalmente por arenitos, estando sua base em contato com rochas cristalinas pré-silurianas, em uma superfície de erosão. No topo, ocorre contato discordante com a Formação Tatuí (SOUZA, 2002). Seu

conteúdo paleontológico é composto por acritarcas, licófitas, esfenófitas, pterófitas, coniferófitas, glossopteridófitas, braquiópodos articulados, gastrópodos, bivalves e foraminíferos (PETRI & SOUZA, 1993).

2.2.1.2 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral, de idade cretácea, é representada por uma sequência de derrames de lavas basálticas, os quais estão, em grande parte, intercalados com camadas arenosas na porção basal. A formação consiste em rochas derivadas de lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. O contato inferior com os arenitos da Formação Botucatu é discordante, enquanto que com outras unidades mais antigas, o contato é marcado por discordância erosiva. O contato superior com a Formação Bauru também é discordante (SCHNEIDER et al., 1974).

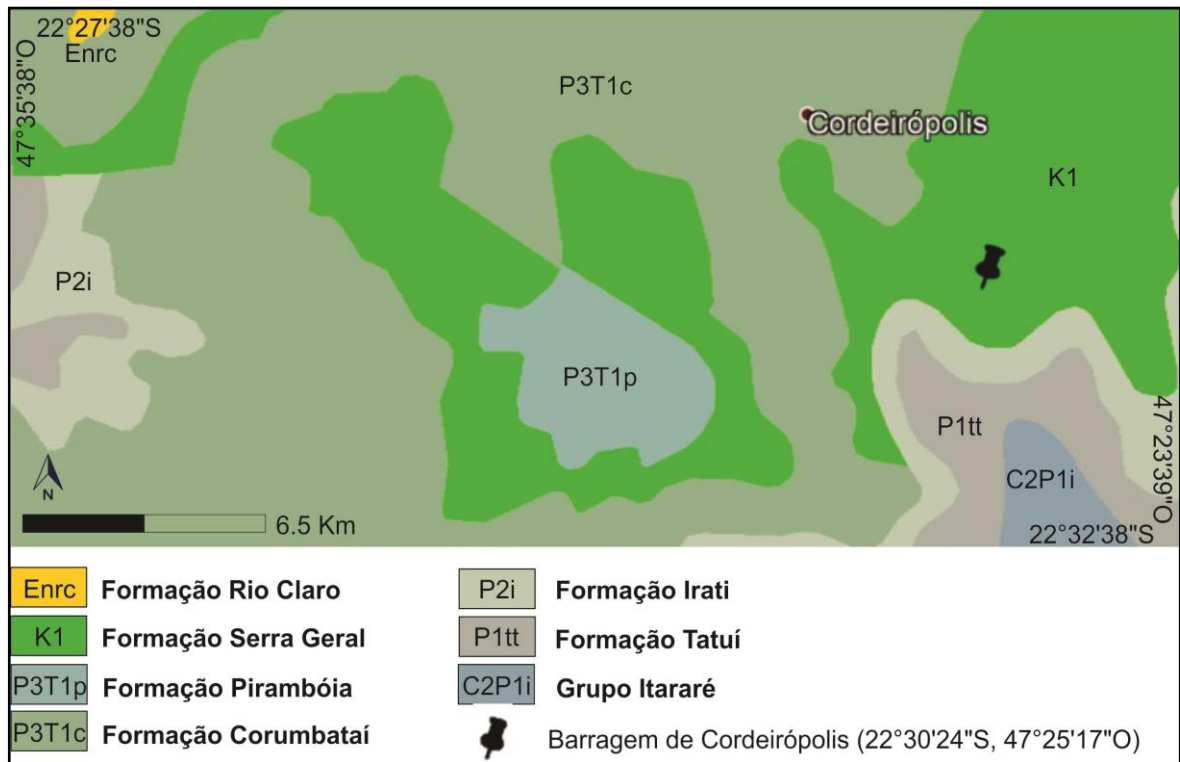
A ocorrência da unidade é generalizada na Bacia do Paraná, podendo atingir espessuras de 1529 metros. A partir de datações radiométricas, a idade principal do vulcanismo da Formação Serra Geral foi definida no intervalo do Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior (SCHNEIDER et al., 1974). Seu ambiente formacional é de magmatismo fissural (PERINOTTO & ZAINÉ, 2008) e acredita-se em condições desérticas no início da sua formação. Não são encontrados conteúdos fossilíferos associados a essa formação.

2.2.2 *Geologia Local*

Como descrito anteriormente, as barragens estudadas encontram-se em áreas de afloramento das unidades lito estratigráficas do Grupo Itararé e da Formação Serra Geral.

A barragem de Cordeirópolis está localizada em zonas de afloramento da Formação Serra Geral (Figura 4), sendo seu material de entorno caracterizado como solo laterítico argiloso, fruto da alteração de rochas básicas características dessa unidade.

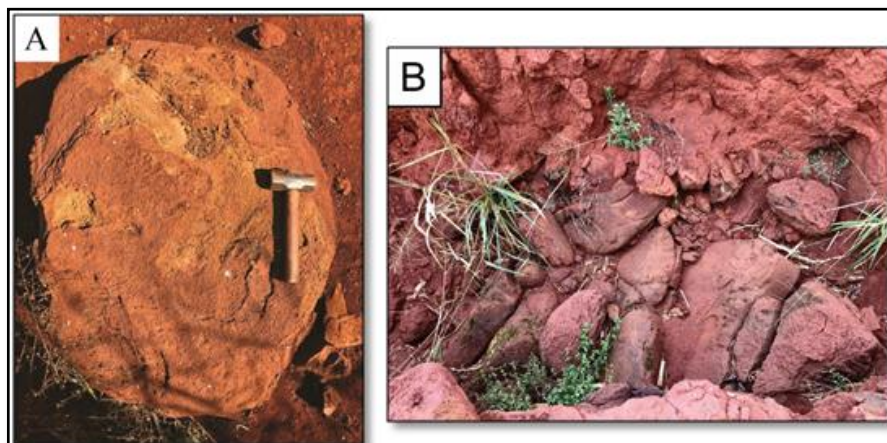
Figura 4 - Mapa geológico local com a localização da barragem de Cordeirópolis.



Fonte: Modificado de CPRM (2006).

Durante o trabalho de campo foi possível observar a presença de blocos e matacões de basalto próximos ao barramento. Na região Sul da barragem há uma vala, de aproximadamente 2 metros de profundidade, onde há uma maior concentração de blocos (Figura 5).

Figura 5 - (A) Bloco de basalto encontrado próximo à barragem; (B) Concentração de blocos em vala na região sul da barragem.

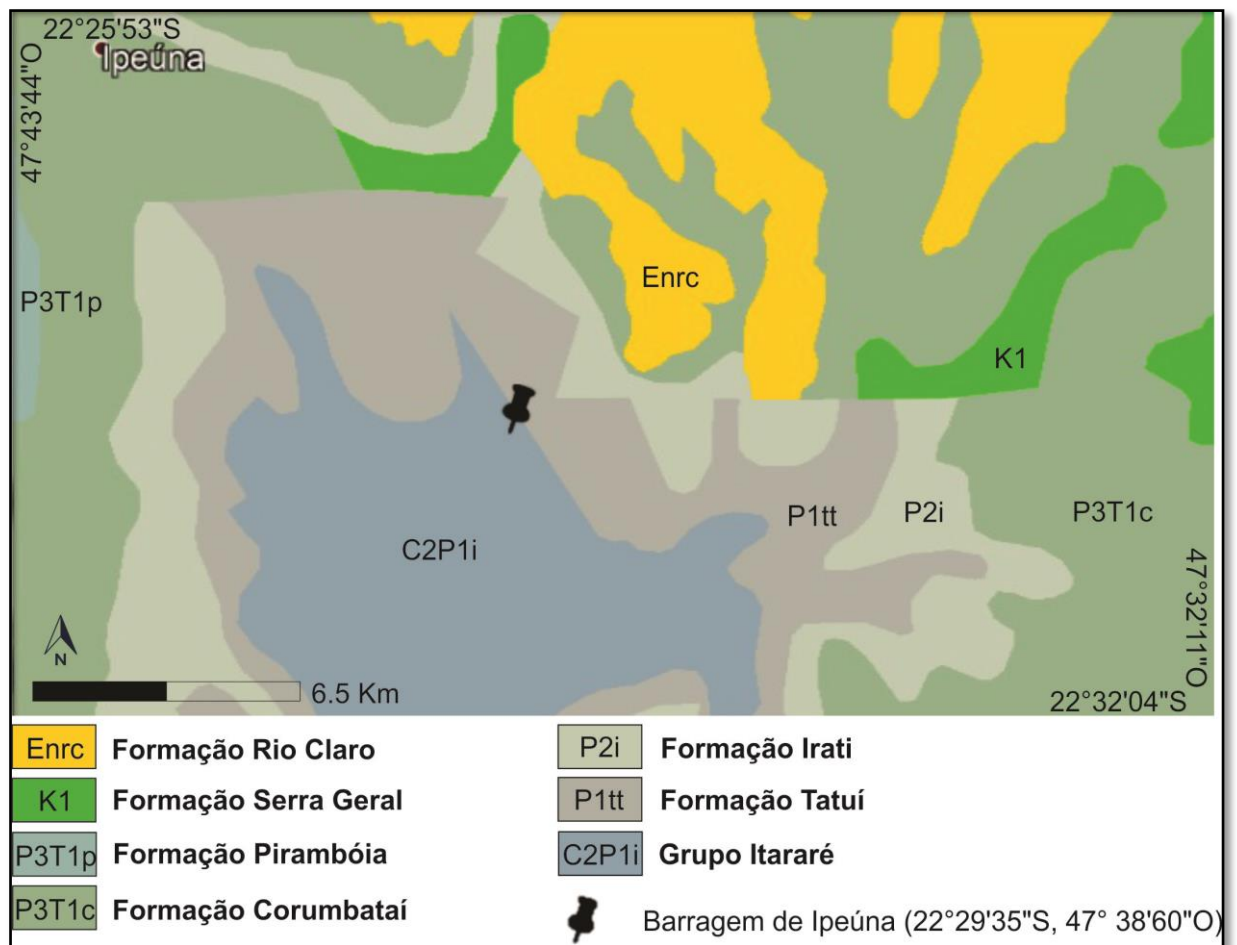


Fonte: Fotos obtidas pela equipe de campo.

Em relação à pedologia do local, a barragem de Cordeirópolis está situada em solos classificados como Latossolos Vermelhos, os quais, de acordo com Rossi (2017), são distróficos, álicos, com textura argilosa e relevo suave ondulado a ondulado.

Já a barragem de Ipeúna, está localizada em fundo de vale do Córrego da Fazenda Covitinga, próximo ao contato das unidades do Grupo Itararé e da Formação Tatuí (Figura 6), sendo seu material composto por solo argilo-arenoso.

Figura 6 - Mapa geológico local com a localização da barragem de Ipeúna.



Fonte: Modificado de CPRM (2006).

Na região oeste da área foi possível observar afloramentos de diamictitos argilosos, de coloração marrom clara com presença de grânulos de aproximadamente 5 centímetros. A leste observou-se uma mudança de litologia, com a presença de sedimentos silto-arenosos, também de coloração marrom clara (Figura 7).

Figura 7 - Afloramento de diamictito próximo à barragem.



Fonte: Foto obtida pela equipe de campo.

Em relação à pedologia, a barragem de Ipeúna situa-se sobre solos classificados como Argilossolos Vermelho-Amarelos, os quais são distróficos, espessoarênico abruptos, com textura arenosa/média, álicos e relevo ondulado (ROSSI, 2017).

3 CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE BARRAGENS

As barragens são estruturas construídas transversalmente à direção de escoamento de um curso d'água, com a finalidade de criar reservatórios para acumulação de água, com tamanhos variados, desde pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto. Elas podem ser classificadas em diferentes categorias, de acordo com seu propósito, projeto hidráulico e material utilizado na sua construção.

É importante conhecer os modelos geométricos e os materiais utilizados na construção de cada barragem, pois facilita na etapa de interpretação dos dados geofísicos adquiridos em campo. Em relação ao objetivo, as barragens podem ser divididas em dois grupos: regularização e retenção.

3.1 Barragens de Regularização

As barragens de regularização objetivam regularizar o regime hidrológico de um rio, armazenando água nos períodos em que a afluência é maior que a demanda, para utilizá-la nos períodos de déficit de afluência em relação à demanda (COSTA, 2012).

De acordo com a finalidade específica da regularização, pode-se buscar aumentar o volume de água armazenada, elevar o nível natural de um curso d'água ou criar um lago. O aumento de volume é utilizado normalmente quando se requer algum tipo de abastecimento, tanto doméstico quanto industrial, além de ser utilizado para irrigação. Já a elevação do nível d'água destina-se, sobretudo, à geração de energia, por meio da transformação da energia potencial hidráulica criada pela queda d'água. Também nesta finalidade, encontram-se melhorias nas condições de navegação fluvial, tanto a jusante, por meio da regularização das vazões no período de estiagem, como a montante, por meio do afogamento de eventuais corredeiras e cachoeiras. Já a criação de lagos artificiais pode ser necessária para o aproveitamento turístico, como também para aprimorar as condições de piscicultura (COSTA, 2012).

3.2 Barragens de Contenção

As barragens de contenção objetivam reter água de forma temporária ou acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração. No caso da retenção de água, essas

barragens têm o objetivo de amortecer a onda de enchentes para evitar inundações. Assim, a onda de cheia é temporariamente armazenada e liberada de forma que a vazão efluente não cause danos à jusante. No caso da retenção de cargas sólidas ou mistas, elas buscam evitar que os materiais retidos danifiquem o leito dos cursos d'água, tanto fisicamente, por meio do assoreamento, como quimicamente, quando os materiais possuem potencial de contaminação (COSTA, 2012).

3.3 Tipos de barragens

Vários critérios podem ser utilizados para agrupar as barragens em classes, sendo os mais comuns: finalidades de uso, características da estrutura, materiais utilizados na construção, parâmetros dimensionais, volume de armazenagem e risco a jusante. No entanto, essas estruturas são geralmente classificadas em termos de materiais utilizados e sua disposição empregada na construção. Diversos autores classificam os tipos de barragens em convencionais, que se referem aos tipos mais utilizados; e não convencionais, que são aquelas normalmente construídas com mais de um material.

Para a construção de um tipo de barragem, diversos fatores devem ser levados em conta, tais como: a seção transversal do vale, profundidade e qualidade da rocha de suporte à fundação, existência de materiais de construção em quantidade suficiente (rocha e argila), regime hidrológico, logística e circulação de equipamentos e materiais, entre outros (CHUGH, 2011).

3.3.1 Barragens convencionais

3.3.1.1 Barragens de terra

As barragens de terra são, provavelmente, uma das primeiras estruturas construídas pela humanidade. Um dos registros mais antigos é uma barragem construída no Egito, há 6,8 mil anos, aproximadamente, com 12 metros de altura. Devido à falta de tecnologia no passado, o material do corpo da barragem era transportado manualmente e compactado através do pisoteamento, realizado por animais ou homens (MASSAD, 2003).

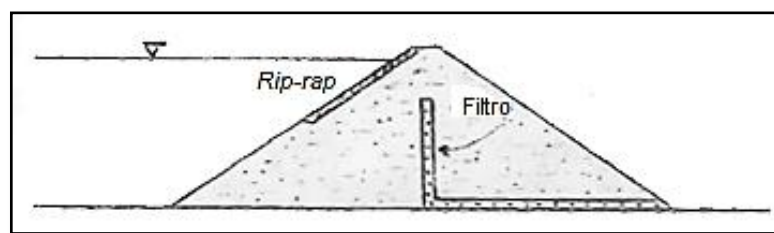
Segundo Vargas (1977), no início do século XX, o Brasil construiu suas primeiras barragens de terra na região Nordeste, as quais foram projetadas em bases empíricas, com

planos de obras para combate à seca. Já a construção da primeira barragem com uso de técnicas modernas de projeto e construção, ocorreu em 1974, e está localizada no estado do Rio de Janeiro.

A barragem de terra é o tipo mais elementar de barragem e possui recomendação para vales muito abertos, de transição entre a montanha e a planície, no terço médio dos rios. Normalmente, se prestam para qualquer tipo de fundação, desde rocha compacta até terrenos constituídos de sedimentos (cascalhos, areias, siltes e argilas). Permite a utilização de enorme variedade de solos na construção do maciço, principalmente com as modernas técnicas de mecânica dos solos e terraplanagens. Exige menor declividade nos parâmetros de montante e jusante, resultando em maiores volumes de aterro; além de possuírem um custo relativamente menor em relação aos demais tipos (NARITA, 2000; FELL et al., 2005).

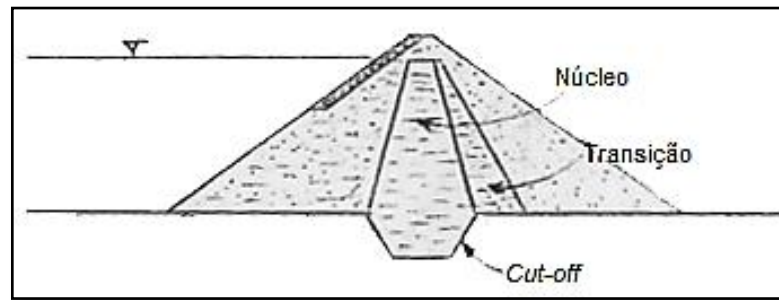
Em relação à seção transversal da barragem, elas podem ser divididas em homogêneas e zonadas. A barragem é considerada homogênea quando há predominância de um único material, embora possam ocorrer elementos diversificados, como filtros, *rip-rap* (quebra-ondas), etc (Figura 8). Já nas barragens consideradas zonadas, há um zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais e/ou permeabilidade. Normalmente, distingue-se um maciço central com função vedante (núcleo), e maciço(s) exterior(es) com função de estabilidade (Figura 9) (COSTA, 2012).

Figura 8 - Barragem de terra homogênea.



Fonte: Costa (2012).

Figura 9 - Barragem de terra zonada.

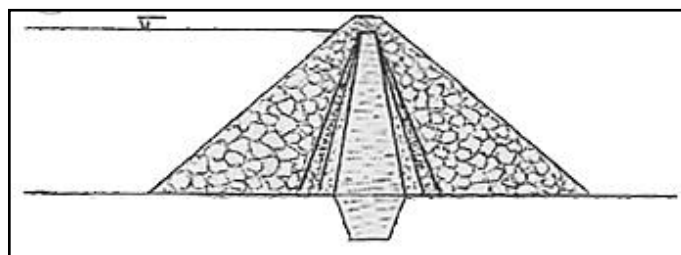


Fonte: Costa (2012).

3.3.1.2 Barragens de enrocamento

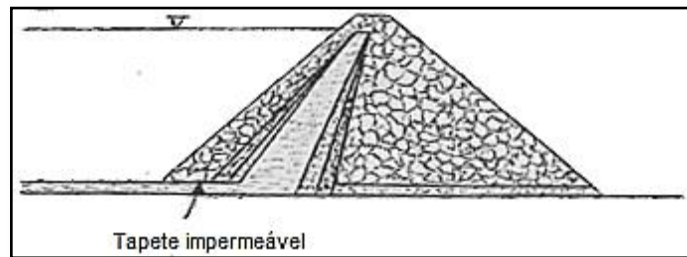
As barragens de enrocamento podem apresentar núcleo impermeável ou face impermeável. Na barragem com núcleo impermeável, o material rochoso é predominante e a vedação da água é feita por meio de um núcleo argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição, para evitar o carreamento do material fino para o interior do enrocamento, sendo que o núcleo pode ficar tanto centralizado como inclinado para montante (Figuras 10 e 11). Já na barragem com face impermeável, a vedação da água é garantida pela impermeabilização da face de montante da barragem, seja por uma camada de asfalto, uma placa de concreto ou uma chapa de aço (Figuras 12 e 13) (COSTA, 2012).

Figura 10 - Barragem de enrocamento com núcleo central.



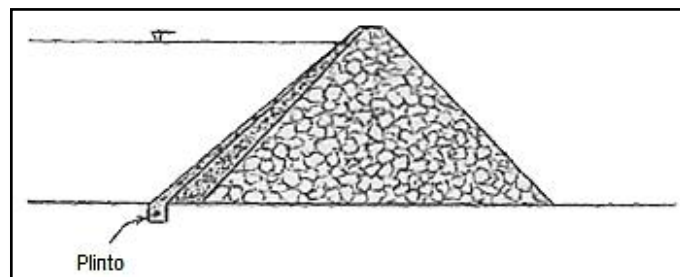
Fonte: Costa (2012).

Figura 11 - Barragem de enrocamento com núcleo inclinado.



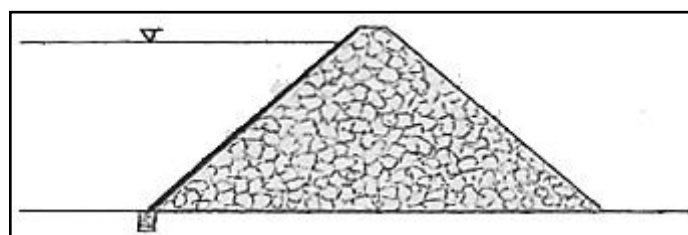
Fonte: Costa (2012).

Figura 12 - Barragem de enrocamento com face de concreto.



Fonte: Costa (2012).

Figura 13 - Barragem de enrocamento com chapa de aço.



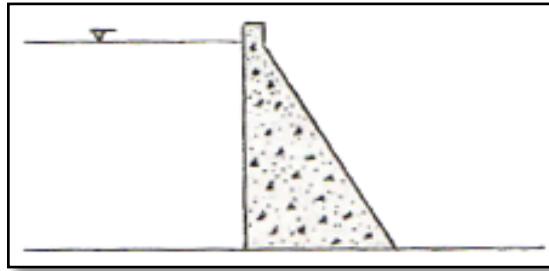
Fonte: Costa (2012).

3.3.1.3 Barragens de concreto

As barragens de concreto podem ser divididas em quatro tipos: gravidade, gravidade aliviada, em contraforte e abóbada. As barragens de gravidade são maciços de concreto, com pouca armação, apresentando traçado retilíneo ou em arco, cuja característica física é ter sua estrutura trabalhando apenas à compressão (Figura 14). Já a de gravidade aliviada, trata-se de

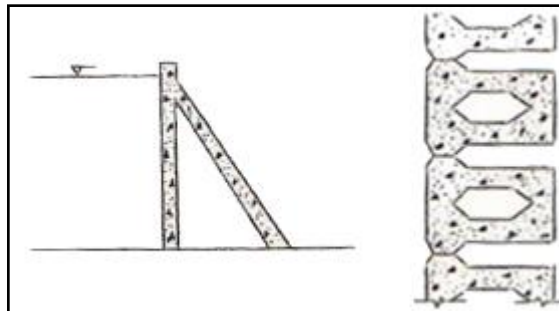
uma estrutura mais leve, com vazios internos, que possuem o objetivo de imprimir menor pressão às fundações ou economizar concreto. Como neste tipo de barragem ocorrem diversos esforços de tração, o uso de armações é maior (Figura 15).

Figura 14 - Barragem de concreto de gravidade.



Fonte: Costa (2012).

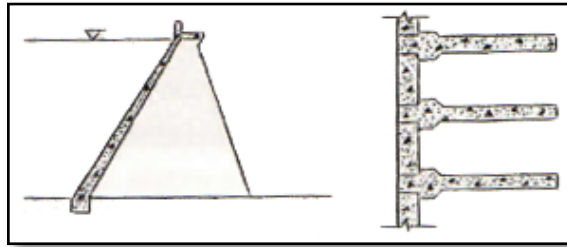
Figura 15 - Barragem de concreto de gravidade aliviada.



Fonte: Costa (2012).

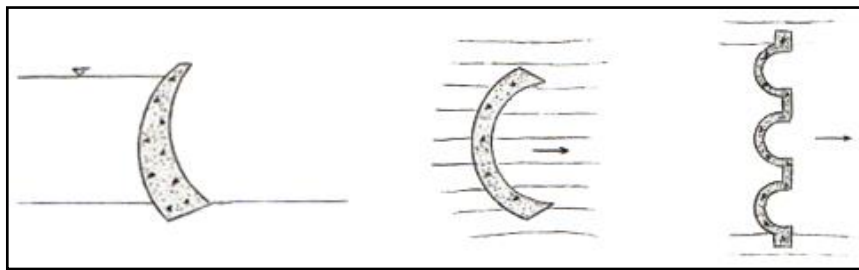
As barragens em contraforte assemelha-se à de gravidade aliviada, porém são ainda mais leves. Por concentrar em pequena área da fundação os esforços causados pela pressão hidrostática, apresenta maiores pressões de contato, o que exige maior armação (Figura 16). As barragens de concreto abóbadas ou em arco são aquelas em que a curvatura ocorre em duplo sentido, ou seja, na horizontal, ou longo do seu traçado, e na vertical. Por isso, são chamadas de barragens de dupla curvatura, podendo os arcos formados serem simples ou múltiplos. É a barragem que consome menos concreto por metro quadrado de superfície represada, e possuem ombreiras por onde parte da pressão hidráulica é transmitida por efeito de arco (Figura 17) (COSTA, 2012).

Figura 16 - Barragem de concreto em contraforte.



Fonte: Costa (2012).

Figura 17 - Barragem de concreto abóboda, apresentando exemplo de arcos simples e múltiplos.

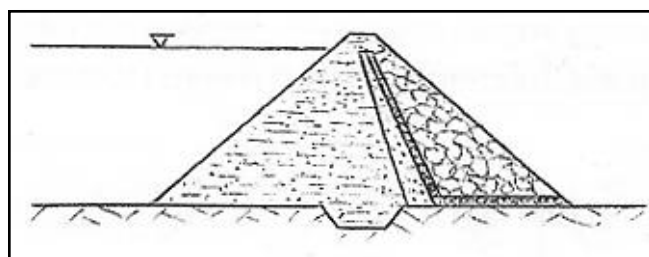


Fonte: Costa (2012).

3.3.1.4 Barragens mistas

A barragem pode ser considerada mista, em sua seção ou em seu traçado, quando são constituídos por diferentes materiais. Os tipos mais comuns são terra/enrocamento, terra/concreto e enrocamento/concreto (Figura 18). Barragens com vertedouro de concreto e corpo de terra ou enrocamento não são consideradas barragens mistas, mesmo que constituam uma continuidade do traçado.

Figura 18 - Barragem mista (terra/enrocamento).



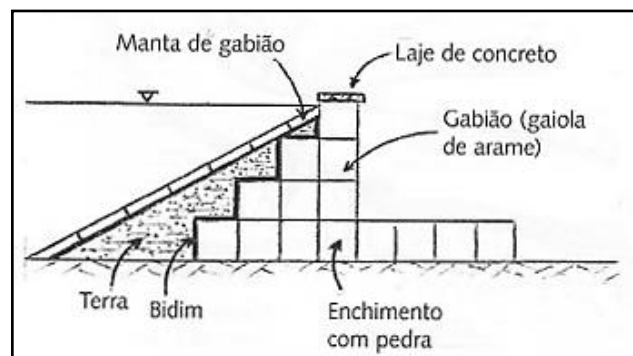
Fonte: Costa (2012).

3.3.2 Barragens não convencionais

3.3.2.1 Barragens de gabião

A barragem de gabião é uma obra de pequeno porte (geralmente inferior a 10 metros de altura) projetada para ser parcial ou totalmente vertedoura. Ela é constituída por uma parede de gabião com extensão para jusante formando a bacia de dissipação aterrada a montante com material argiloso. Para evitar o carreamento de finos, é necessária uma transição ou manta de bidim entre a argila e o gabião, além de uma placa de concreto na parte de vertência que irá garantir a proteção do coroamento para grandes vazões efluentes (Figura 19) (COSTA, 2012).

Figura 19 - Barragem de gabião.

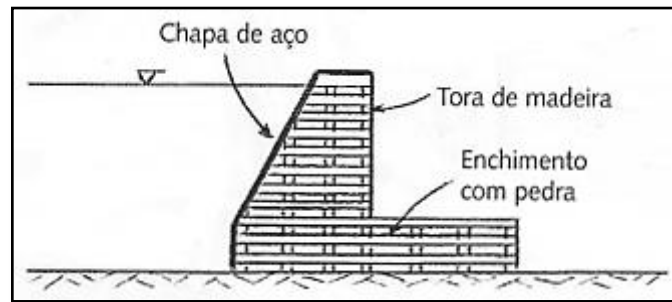


Fonte: Costa (2012).

3.3.2.2 Barragens de madeira

Esse tipo de barragem é construído com madeira de alta qualidade, a qual deve ser revestida com uma chapa de aço que garantirá a sua vedação. As caixas de madeira devem ser preenchidas com rocha para evitar o seu deslocamento devido às pressões hidrostáticas (Figura 20) (COSTA, 2012).

Figura 20 - Barragem de madeira.



Fonte: Costa (2012).

3.3.2.3 Barragens de alvenaria de pedra

A barragem de alvenaria de pedra constitui uma variação da barragem de gravidade, em que o concreto é substituído por alvenaria de pedra rejuntada manualmente com cimento, não exigindo a utilização de armação nem de fôrma.

3.4 Problemas associados a barragens

Um defeito na estrutura de uma barragem pode gerar um incidente ou acidente. No primeiro caso, é um evento de pequeno porte que prejudica a funcionalidade e/ou integridade da obra. Já um acidente, é um evento de grande porte que corresponde à ruptura parcial ou total da obra e/ou a sua completa impossibilidade de operação, com graves consequências econômicas, ambientais e sociais. Quando não corrigido adequadamente, um incidente pode evoluir para um acidente (ANA, 2015).

Diversas causas, tanto naturais como provocadas pela intervenção ou omissão do homem, podem causar falhas e consequentes rupturas no corpo de uma barragem, tais como: inundações, terremotos, deslizamentos na bacia hidráulica, falha estrutural (projeto e/ou execução deficientes, ou mal uso de materiais na construção), falha de fundação, infiltrações com erosão, manutenção inadequada de estruturas ou equipamentos, desativação da barragem, etc.

Os principais problemas associados a rupturas de barragens são associados a falhas de projetos – principalmente na fase de execução – e problemas operacionais e de manutenção. Alguns problemas que ocorrem na fase do projeto executivo de engenharia podem ser

associados à escolha indevida de materiais de empréstimo para o corpo de barragem, dimensionamento indevido do corpo da estrutura e de vertedouros – que podem acarretar em desestabilização da estrutura em eventos de ondas de cheia, compactação insuficiente de uma determinada camada do corpo da barragem, etc.

Grande parte das barragens brasileiras possui mais de 30 anos. Muitas não atendem a requisitos mínimos de segurança empregados atualmente, sendo, assim, frequentes os problemas relacionados à falta de drenagem interna e compactação pouco eficiente (PERINI, 2009).

Outro conjunto de problemas frequente está associado à falta de manutenção do empreendimento, muitas vezes não realizada devido aos altos custos para adequação das estruturas, ou por serem obras tecnicamente muito complexas. Assim, as intervenções podem ocorrer apenas em casos extremos, o que pode ocasionar problemas, como aparecimento de fissuras, galgamento¹ da barragem, deslizamentos de talude e processos de erosão interna como *piping*². As fissuras podem estar associadas a recalques das fundações, abalos sísmicos, degradação da estrutura, entre outros, podendo evoluir para brechas, que ocasionam planos de fraqueza, e consequente maior percolação de água, podendo desencadear problemas de estabilidade.

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

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

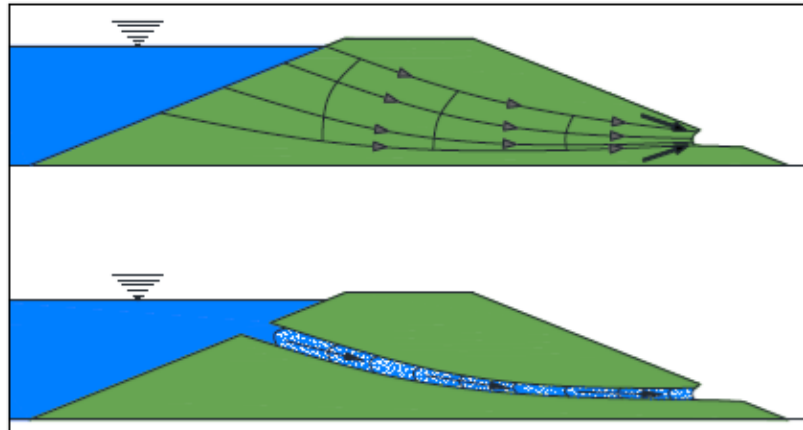
A erosão interna mais comum em barragens de terra é o fenômeno conhecido como *piping*. A forma mais comum de ocorrência de *piping* é através da erosão regressiva, onde a erosão atua de jusante para montante no corpo da barragem e forma um tubo com um canal

¹ O galgamento ocorre quando o vertedouro não tem capacidade suficiente frente a uma cheia e a água verte sobre a estrutura da barragem, o que pode ocasionar a erosão do talude de jusante da barragem e consequentemente a ruptura da barragem.

² O fenômeno denominado *piping* é o processo de erosão interna que provoca a remoção de partículas do interior da barragem, formando vazios que provocam o colapso e/ou escorregamento da estrutura.

preferencial por onde a água percola (Figura 21). Segundo Massad (2003), há alguns fatores condicionantes ao *piping*: ausência de filtros e elementos drenantes internos, condições de compactação do maciço, ausência de transições adequadas entre solos e materiais granulares e presença de fundações arenosas.

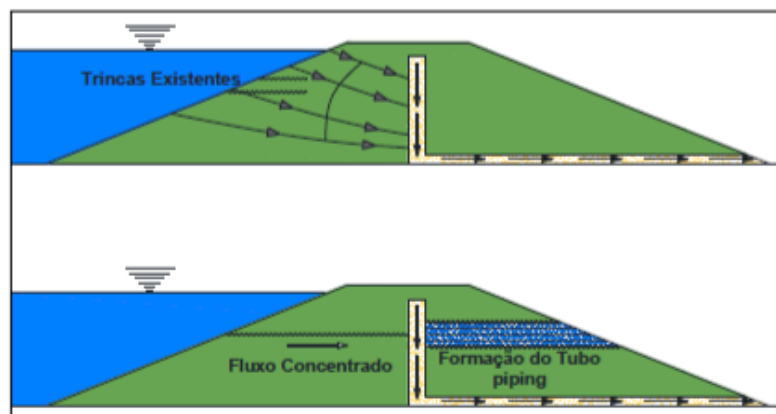
Figura 21 - Mecanismo de formação de *piping*, a partir de erosão regressiva.



Fonte: Modificado de Perini (2009).

Outra importante forma de ocorrência de piping é através de trincas existentes na barragem que permitam a formação de um fluxo concentrado. O fluxo concentrado pode causar erosão e evoluir para um tubo, que caracteriza o piping (Figura 22). Entretanto, bastam apenas pequenos incrementos de permeabilidade para causar o aumento de poropressão e resultar na ocorrência de piping e consequente perda da estabilidade (PERINI, 2009).

Figura 22 – Processo de *piping* causado por trincas existentes na barragem.



Fonte: Modificado de Perini (2009).

3.5 Segurança de barragens

Os principais órgãos de controle e fiscalização de barragens em todo o mundo baseiam-se em suas experiências históricas, ou seja, os diferentes modos que as barragens podem falhar já são conhecidos, inclusive os métodos de remediação. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais danos e respectivas causas de rompimento de barragens, excluindo-se causas decorrentes de subdimensionamento, operação deficiente ou falha em equipamento.

Tabela 1 - Categorização e principais causas de danos em barragens de terra (*).

Dano	Causa do dano
Erosão interna	Percolação descontrolada; lixiviação; carreamento de partículas; e furos realizados por animais; vegetação.
Fissuramento	Ressecamento superficial; zonas tracionadas em maciços argilosos; recalque diferencial; movimentação diferencial entre materiais com diferentes deformabilidades.
Subsidência e deformação	Recalque; recalque diferencial; ação erosiva interna.
Galgamento	Inundação superior aos critérios de projeto; capacidade inadequada do vertedouro; ruptura de barragem à montante; movimentação de massa para o interior da bacia hidráulica; e, falha de operação.
Problemas na fundação	Tratamento deficiente da fundação, pressão piezométrica elevada, percolação descontrolada.
Escorregamento de talude	Rebaixamento rápido do reservatório, subpressão elevada na fundação, materiais de baixa resistência na fundação, escavação no pé do talude, e sismo.
Surgência de água	Drenagem deficiente; elevação do lençol freático.
Liquefação	Sismo.

(*) Excluindo causas decorrentes de subdimensionamento, operação deficiente ou falha em equipamento.

Fonte: Teixeira (2013).

A segurança de barragens corresponde à capacidade da barragem de satisfazer as exigências de comportamento necessárias, ou seja, apresentar desempenho capaz de evitar incidentes e acidentes relacionados a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais, ou ao menos manter os riscos em níveis aceitáveis.

Este assunto passou a ser uma preocupação internacional a partir de 1950, com o trabalho desenvolvido pelo *International commission on Large Dams* – ICOLD. No ano de 1979 ocorreu o Congresso Internacional de Grandes Barragens em Nova Delhi, Índia, onde aumentou o foco para o assunto. A preocupação da Comissão Internacional de Grandes

Barragens – CIGB, junto com a experiência de diversos países, estimulou o desenvolvimento de planos para segurança de barragens (CESTARI JUNIOR, 2013).

No Brasil, o tópico de segurança de barragens passou a ser abordado em seminários nacionais a partir de 1963, em São Paulo. No final de 1976, o atual Comitê Brasileiro de Barragens formou um Grupo de Segurança de Barragens para criação de uma minuta que servisse de orientação para investigação e avaliação da segurança em barragens (CESTARI JUNIOR, 2013).

A Lei nº 12334 de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinadas às acumulações de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Os objetivos da PNSB são: garantir a observância de padrões de segurança de barragens, de modo a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências; regulamentar as ações de segurança a serem adotadas em todas as fases, desde o planejamento até a desativação e/ou usos futuros; promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança adotadas pelos responsáveis por barragens; a criação de condições para a ampliação do universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; estabelecimento de conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; e fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Os responsáveis pela fiscalização das barragens no Brasil são: Agência Nacional das Águas – ANA, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Anualmente, a ANA é responsável por elaborar e publicar o Relatório de Segurança de Barragens (RSB), o qual possui o objetivo de apresentar à sociedade o panorama da evolução de segurança das barragens brasileiras e a implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens.

4 METODOLOGIA

4.1 Geofísica aplicada ao estudo de barragens

Para identificação e caracterização de estruturas com potencial de comprometer a segurança de barramentos e estruturas anexas, principalmente a longo prazo, vários autores utilizaram o monitoramento, através de medições diretas e indiretas.

Dentre as metodologias indiretas estão os métodos geofísicos, os quais são ótimas ferramentas no estudo de barragens, por serem não destrutivos, não prejudicando, assim, a estrutura ou agravando potenciais problemas no corpo de um barramento. Além disso, diferentemente dos métodos diretos, que oferecem apenas dados pontuais sobre a barragem, os métodos geofísicos geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis anomalias na estrutura da barragem. Some-se a isso o fato de serem mais rápidos e possuírem um melhor custo benefício em relação às investigações diretas. Os principais métodos geofísicos empregados nos projetos de barragens são: eletrorresistividade, georadar (GPR), o potencial espontâneo (SP) e os sísmicos, que foram utilizados neste estudo.

Diversos estudos demonstraram o potencial dos métodos geofísicos para fornecer informações sobre a estrutura, os tipos de materiais, a presença (e fluxo) de água, entre outras características que podem ocorrer em uma barragem de terra. Em relação aos métodos sísmicos, alguns autores utilizaram principalmente a sísmica de refração, porém, em muitos casos, normalmente seu emprego encontra-se associado a outros métodos geofísicos. Neste trabalho, os resultados finais apresentados também serão comparados com demais métodos que foram empregados na área de estudo. São diversas as modalidades de aplicações geofísicas encontradas na bibliografia a cerca deste tema e algumas serão citadas na sequência.

No estudo de Osazuwa e Chinedu (2008) dados obtidos através da sísmica de refração possibilitaram a identificação de mais de cinco camadas com velocidades diferentes dentro em uma barragem de terra em Zaria, Nigéria, além da observação de canais de infiltração ao longo dos dois flancos da represa. Os dados adquiridos foram processados através da inversão tomográfica, e os resultados se mostraram satisfatórios.

Em Malagutti Filho et al (1999), os autores utilizaram a combinação dos métodos da eletrorresistividade e refração sísmica. O objetivo era efetuar o zoneamento geofísico do perfil de alteração para caracterização de solos e rochas do sítio de uma pequena barragem, no

município de Tambaú – SP, uma vez que no local existia uma barragem que foi rompida por ser construída em uma zona de fraturas, o que gerou instabilidade na estrutura. Os resultados foram satisfatórios, e os autores conseguiram determinar o topo rochoso com precisão a partir do método da sísmica de refração e, com a eletrorresistividade foi possível caracterizar a zona de fraturamento do maciço.

Na barragem Mathis Creek na Califórnia, Bedrosian et al (2012) fizeram uma investigação com a combinação de diversos métodos geofísicos, como eletrorresistividade, magnetometria, sísmica e mapeamento aéreo por Lidar³. Com o processamento dos dados foi possível identificar feições de geologia estrutural regional e, a partir de ensaios realizados em campo identificar zonas de contato de unidades litológicas entre depósitos aluvionares, derrames vulcânicos e ainda percolação de água no contato das unidades.

Camarero (2016) realizou um estudo em duas barragens de terra no interior do estado de São Paulo e utilizou o método da Eletrorresistividade com o arranjo Wenner para determinar eventuais zonas de infiltração. Além do método geofísico, também foi utilizado ensaios geotécnicos para complementar a pesquisa. Para cada barragem foram adquiridas três linhas geofísicas paralelas ao eixo longitudinal da barragem, com espaçamento de 2 metros. Os resultados gerados apresentaram zonas de baixos valores de resistividade elétrica, que interpretados como zonas saturadas e prováveis zonas de infiltração no corpo da barragem. Uma das áreas de estudo do trabalho Camarero (2016) é a barragem de Cordeirópolis, que foi a mesma escolhida para ser estudada no presente trabalho.

4.2 Métodos Sísmicos

Os métodos sísmicos de prospecção baseiam-se na propagação de ondas elásticas através dos solos e rochas que integram a crosta terrestre. Essas ondas podem ser geradas por meio da detonação de pequenas quantidades de explosivos ou de impactos mecânicos. As ondas geradas se propagam tridimensionalmente a partir da fonte e são submetidas aos fenômenos de refração, reflexão e difração. As características da propagação dependem principalmente das propriedades elásticas dos minerais e rochas, mas sua velocidade também pode sofrer influências de outros fatores, como vazios entre grãos, presença de fraturas, além dos materiais que podem preencher total ou parcialmente esses meios, sejam sólidos ou

³ *Light Detection and Ranging* – trata-se de uma tecnologia baseada na utilização de perfiladores laser aerotransportados, que emitem diversos pulsos infravermelhos em direção à superfície da Terra (ou qualquer outro objeto) de forma repetitiva, permitindo a obtenção de informações tridimensionais acerca da superfície terrestre com alta precisão.

líquidos. Ao retornarem à superfície, as ondas são captadas por geofones, os quais transformam a energia mecânica em um pulso elétrico (MALAGUTTI, 1991).

4.2.1 Tipos de Ondas Sísmicas

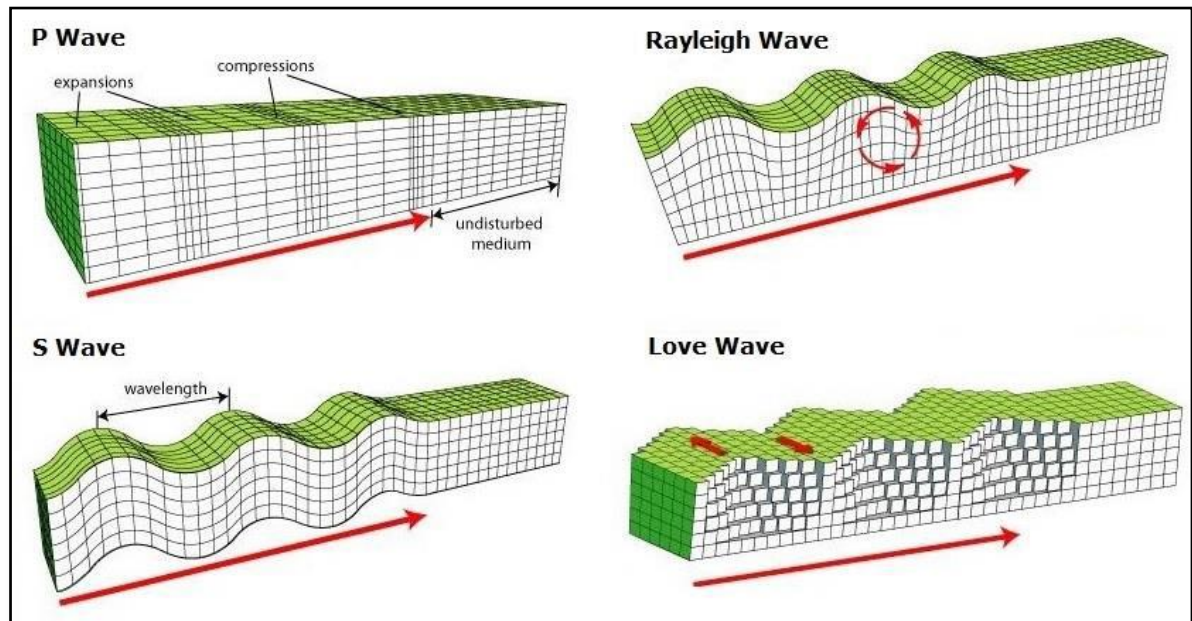
Em um meio homogêneo, dois tipos de ondas elásticas podem ser observadas: as ondas de corpo, que são divididas em longitudinais (compressionais ou P) e transversais (cisalhantes ou S), e as ondas superficiais. As ondas de corpo possuem a capacidade de se propagarem tanto na superfície como no interior dos materiais. Já as ondas superficiais, como o próprio nome já diz, se propagam apenas na superfície e têm sua amplitude rapidamente atenuada com a profundidade (MOONEY, 1984).

As ondas longitudinais são aquelas em que o movimento das partículas ocorre na mesma direção de propagação das ondas. Quando ocorre um sismo, elas são as primeiras ondas a serem registradas, por isso são denominadas de ondas primárias ou ondas P. Além disso, elas se propagam tanto em meios sólidos quanto em fluidos, pois todos esses meios são compressíveis. Já nas ondas transversais, o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda. A passagem dessas ondas provocam variações de forma no meio, através de esforços cisalhantes. Sendo a rigidez a principal propriedade relacionada à velocidade de propagação dessas ondas, as ondas transversais não se propagam em meios fluidos, pois a rigidez neles é zero. Além disso, essas ondas são mais lentas que as ondas longitudinais, logo, são registradas depois, sendo denominadas de ondas S (*shear waves*) (SJOGREN, 1984).

As ondas superficiais são ondas que se formam na superfície livre, e também podem ser diferenciadas em ondas *Rayleigh* e *Love*, que se distinguem pelo tipo de movimento que as partículas exercem durante sua trajetória. Nas ondas *Rayleigh* as partículas se deslocam no plano vertical em um movimento elíptico e retrógrado, perturbando, além da superfície livre do meio, as partículas abaixo deste, tendo sua amplitude diminuída com o aumento da profundidade. Já nas ondas *Love* as partículas vibram horizontalmente e perpendicularmente ao sentido de propagação da vibração, correspondendo a superposições de ondas S com vibrações horizontais concentradas nas camadas mais externas da Terra (DOURADO, 2012).

Na Figura 23, a seguir, é possível observar como as partículas do meio se movimentam com a passagem de cada tipo de onda.

Figura 23 – Movimento de partículas associado à passagem de diferentes tipos de ondas.



Fonte: Eikmeier (2018).

Uma vez que são as primeiras ondas a serem registradas pelos geofones, e consequentemente serem de mais fácil identificação nos sismogramas, as ondas longitudinais são as principais a serem analisadas a partir dos métodos de prospecção sísmica (reflexão e refração). Entretanto, a partir do desenvolvimento das metodologias de ensaios em anos mais recentes, a caracterização do meio a partir da propagação das ondas S e das ondas superficiais, também tem sido possível.

4.2.1.1 Velocidades de propagação das ondas sísmicas em solos e rochas

A utilização dos métodos de prospecção sísmica na solução de muitos problemas geológicos e geotécnicos é possível devido à possibilidade de caracterização dos materiais de subsuperfície, em termos de velocidade de propagação de ondas sísmicas (MALAGUTTI FILHO, 1991).

As velocidades de propagação da onda longitudinal (V_p) e da onda transversal (V_s), podem ser expressas com base nas constantes elásticas e na densidade dos materiais, entretanto elas são muito diferentes uma da outra, pois enquanto as ondas P se propagam com velocidades proporcionais apenas ao módulo de elasticidade do meio, as ondas S se propagam

com velocidades proporcionais tanto ao módulo de elasticidade como ao módulo de rigidez. As equações que regem essas proporcionalidades são:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2}(1+\nu)} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

E = módulo de elasticidade, ou de Young;

ν = coeficiente de Poisson;

ρ = densidade do meio;

G = módulo de rigidez.

Essas equações foram determinadas a partir da aplicação das leis da teoria da elasticidade para materiais homogêneos e isotrópicos⁴, e é possível observar que a velocidade das ondas transversais é menor que das ondas longitudinais no mesmo meio (SJOGREN, 1984).

Em relação às ondas longitudinais, as quais foram utilizadas nesta dissertação na análise da sísmica de refração para determinação da profundidade e avaliação da composição e qualidade da rocha, elas possuem faixas de valores de velocidades específicas para cada material, as quais são apresentadas na Tabela 2.

⁴ Um meio isotrópico é aquele em que as propriedades não variam em função da direção.

Tabela 2 - Valores de propagação da onda longitudinal (P) nas rochas.

Material		Vp (m/s)
Água		1450 - 1500
Ar		310 - 360
Solo		100 - 500
Areia	inconsolidada	200 - 800
	saturada	1500 - 2000
	seca	400 - 1200
Argila		1000 - 1600
Arenito		2000 - 5200
Conglomerado		2500 - 5000
Marga		1800 - 3200
Calcário		4000 - 6000
Dolomita		5000 - 6000
Quartzito		4400 - 5200
Folhelhos e ardósias		2400 - 5000
Dunito		7500 - 8100
Gabro		6400 - 7000
Gnaisse		4800 - 5500
Granito		4000 - 6000
Diabásio		5500 - 6500

Fonte: Modificado de Sjogren (1984).

Além disso, algumas características podem influenciar na distribuição de velocidades através de um perfil, como: o grande contraste entre materiais não consolidados do solo e rochas ígneas/metamórficas, a natureza transitória das velocidades nas rochas sedimentares mais jovens, a influência do teor de água nas velocidades de solos inconsolidados e a sobreposição parcial de velocidades para diferentes tipos de material (SJOGREN, 1984).

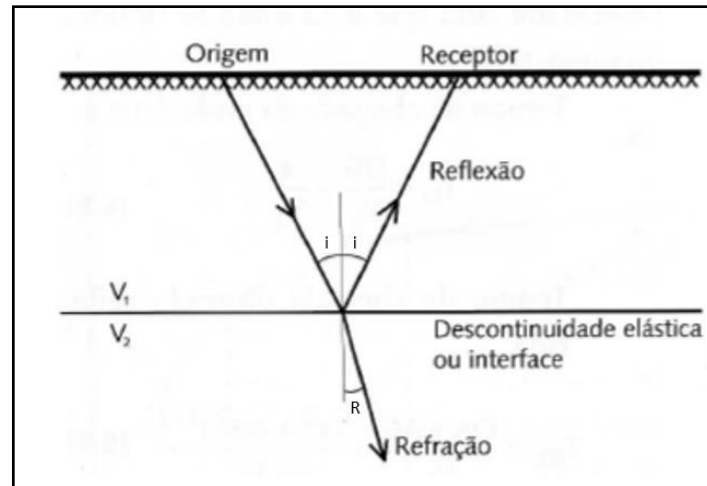
4.2.1.2 Trajectoria dos raios sísmicos

Quando uma onda elástica incide sobre uma interface entre dois meios com impedâncias acústicas⁵ diferentes, parte da energia original retorna à superfície, enquanto outra parte atravessa essa interface, penetrando no meio subjacente, com abrupta variação na direção de sua propagação. A energia que volta à superfície corresponde à reflexão da onda,

⁵ A impedância acústica de um material é a resistência ou dificuldade que o material opõe à passagem da onda. É o produto da densidade de um meio pela velocidade de propagação das ondas elásticas nesse meio ($K=\rho.v$).

enquanto a parte da energia que penetra na interface corresponde à refração da onda (Figura 24).

Figura 24 - Reflexão e refração sísmicas.

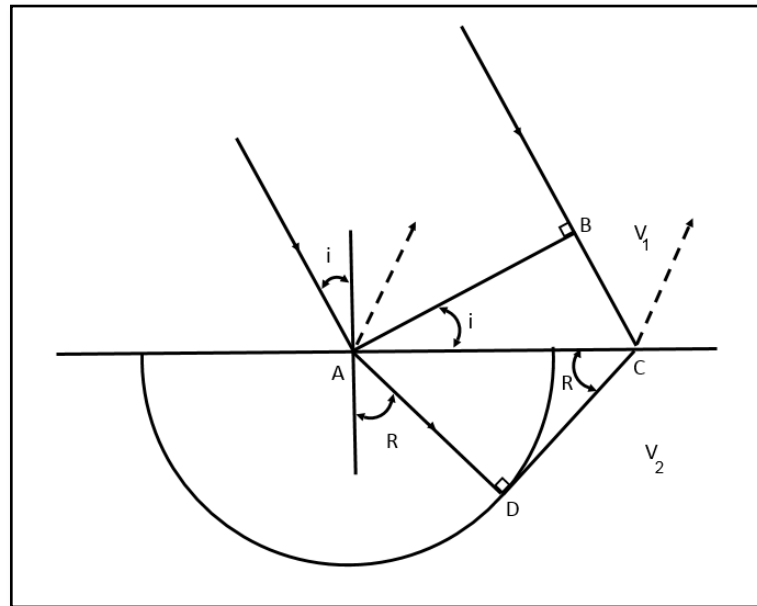


Fonte: Costa (2012).

A distribuição da energia inicial, entre as ondas resultantes dependerá do ângulo de incidência (i) com que a onda sísmica chega à interface e, do contraste de impedância acústica entre os dois meios.

Já a direção das ondas refratadas ou refletidas, ou seja, o ângulo com o qual deixam a interface, é determinada pela lei de Snell.

Quando uma onda incidente atinge uma interface que separa dois meios, cada ponto na interface se torna a fonte de uma onda hemisférica viajando para o segundo meio com a velocidade nesse meio. A onda, através da camada superior, colide obliquamente na interface entre as duas camadas com velocidades V_1 e V_2 , como pode ser observado na Figura 25. Assume-se que V_1 é menor que V_2 , e que a frente de onda AB no meio superior deve ser considerada como plana. A onda incidente dá origem a duas novas ondas ao alcançar a interface, com parte da energia sendo refletida de volta ao meio superior e outra parte refratada no meio inferior.

Figura 25 - Lei de Snell ($V_1 < V_2$).

Fonte: Sjogren (1984).

As frentes de onda refletidas, cujos raios são mostrados por linhas tracejadas, fazem o mesmo ângulo com a interface que as frentes de onda incidentes e, conseqüentemente, os caminhos dos raios incidentes e refletidos fazem o mesmo ângulo com a normal da interface. No meio inferior, as ondas mudam de direção, pois as propriedades dos meios são diferentes, ou seja, as ondas são refratadas.

Analisando-se o caso da refração, pode ser observado na Figura 25 que, quando a frente de onda atinge a interface em A, sua posição em outro raio é B no meio superior. Durante o tempo t em que a onda no meio superior viaja de B a C, onde o segmento BC é igual a $V_1 t$, o ponto A atua como fonte de uma frente de onda hemisférica que se propaga no meio inferior, sendo o raio do hemisfério igual a $V_2 t$. De C, uma tangente é traída para o semicírculo, a qual representa um envelope das ondas com semicírculos menores que emanam durante o tempo t de cada ponto entre a interface entre A e C. A partir do quadrilátero ABCD, a lei de Snell pode ser definida pela equação 3 a seguir.

$$\frac{\sin i}{\sin R} = \frac{V_1}{V_2}$$

(Eq.3)

Onde:

i = ângulo de incidência da onda;

R = ângulo de refração da onda;

V_1 = velocidade de propagação da onda no meio 1;

V_2 = velocidade de propagação da onda no meio 2.

Neste caso, V_2 é maior que V_1 e, conseqüentemente, R é maior que i . Quando i aumenta, ocorre um caso único em que o ângulo de refração R é 90° e $\text{sen}R = 1$ (Equação 4).

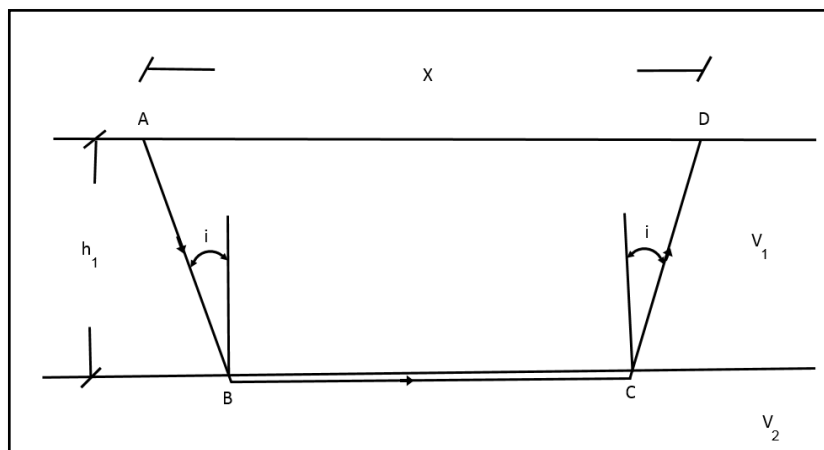
$$\text{sen}i = \frac{V_1}{V_2} = \text{sen}i_{12}$$

(Eq.4)

O ângulo i_{12} é chamado de ângulo crítico. Para ângulos de incidência maiores que i_{12} , a energia é totalmente refletida na camada superior. A lei de Snell não pode ser satisfeita, pois $\text{sen}R$ não pode exceder a unidade.

Nos casos onde o meio inferior apresenta velocidade de propagação maior que o superior, o ângulo de refração R é maior que o ângulo de incidência i . Neste caso, o raio incidente se propaga pela interface que separa os dois meios e retorna à superfície, ocorrendo assim o fenômeno da refração total (Figura 26). Neste caso, o ângulo de incidência será igual ao ângulo crítico i_{12} acima mencionado.

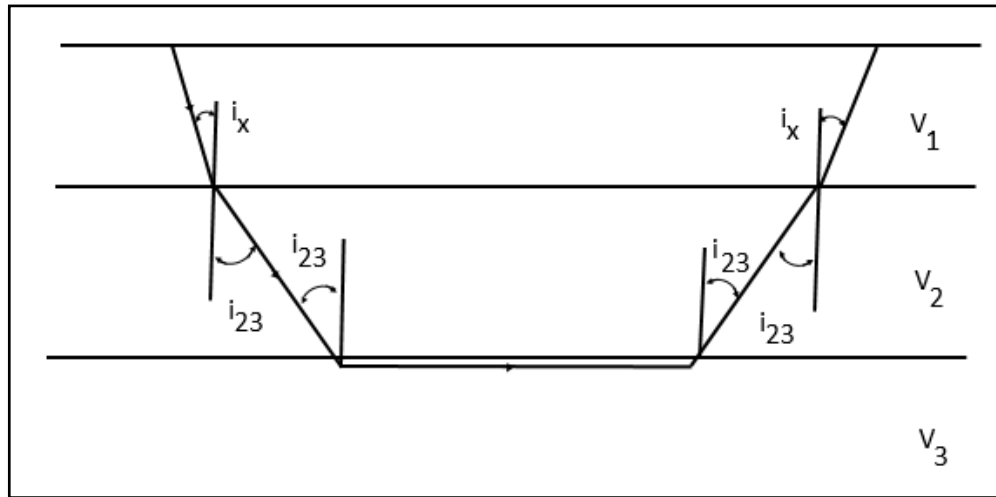
Figura 26 – Refração total.



Fonte: Sjogren (1984).

Para o caso de múltiplas camadas, os caminhos dos raios de menor tempo seguem as mesmas leis de um caso de duas camadas, mas as condições são mais complicadas. Na Figura 27 o ângulo crítico i_{23} é obtido pela relação $\text{sen}i_{23} = V_2/V_3$.

Figura 27 - Refração com múltiplas camadas.



Fonte: Sjogren (1984).

O desconhecido ângulo de incidência i_x é expresso de acordo com a lei de Snell, como observado na equação 5:

$$\frac{\text{sen}i_x}{\text{sen}i_{23}} = \frac{V_1}{V_2}$$

(Eq. 5)

Substituindo $\text{sen}i_{23}$ por V_2/V_3 , obtêm-se a equação 6:

$$\text{sen}i_x = \frac{V_1 V_2}{V_2 V_3} = \frac{V_1}{V_3}$$

(Eq.6)

O ângulo de incidência na camada superior é denominado i_{13} e é obtido pela equação 7:

$$\text{sen}i_{13} = \frac{V_1}{V_3}$$

(Eq.7)

A expressão geral do ângulo de incidência para o caso de múltiplas camadas será (Equação 8):

$$\text{sen}i_{vn} = \frac{V_v}{V_n}$$

(Eq.8)

Já a Equação 9 será para o ângulo crítico:

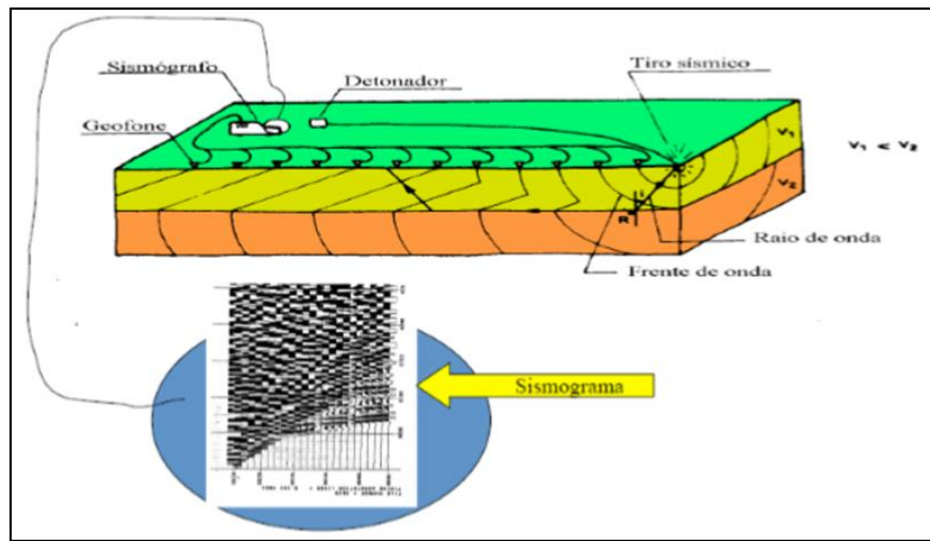
$$\text{sen}i_{(n-1)n} = \frac{V_{n-1}}{V_n}$$

(Eq.9)

4.2.2 *Sísmica de Refração*

O método da sísmica de refração consiste em analisar o tempo de percurso de ondas longitudinais, geradas na superfície e que, ao sofrerem refração total nas sucessivas interfaces que separam diferentes unidades litoestruturais em profundidade, retornam à superfície. Ao chegarem à superfície, essas ondas serão captadas em detectores, denominados geofones, previamente espaçados e alinhados de acordo com o objetivo do estudo. A premissa a ser considerada é de que os detectores, as fontes de ondas e os raios sísmicos estudados estão contidos em um mesmo plano (SJOGREN, 1984) (Figura 28).

Figura 28 - Esquema de execução da sísmica de refração, com o respectivo sismograma obtido.

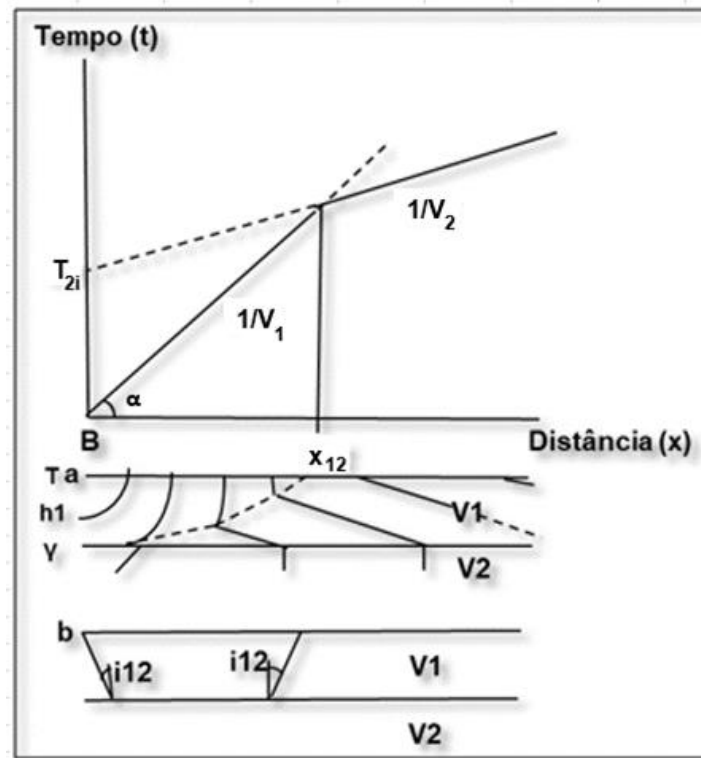


Fonte: Dourado (2008).

As ondas são geradas por uma fonte e os tempos de percurso registrados nos geofones, obtendo-se para cada geofone o tempo de chegada da onda longitudinal, em função da respectiva distância até a fonte. Esses valores são representados em um gráfico tempo x distância, no qual cada horizonte com velocidade diferente será representado por uma série de pontos que definirão retas, cujo inverso da inclinação ($1/V$) será compatível com a velocidade do meio atravessado por refração. Portanto, quanto menor a velocidade, mais íngreme será a inclinação da reta tempo-distância. A linha que une todos esses pontos é chamada de dromocrônica (SJOGREN, 1984).

A Figura 29 mostra um caso simples de duas camadas e interfaces planas. A partir do ponto de impacto B, as ondas se espalham, de acordo com a Lei de Snell, para os dois meios que compõem a subsuperfície.

Figura 29 - Princípio fundamental da sismica de refração.



Fonte: Sjogren (1984).

Nas proximidades do ponto B, as ondas viajam na camada superior com a velocidade V_1 e, ao atingir a segunda camada, propagam-se com a velocidade mais alta V_2 . As ondas na segunda camada geram ondas na camada superior, devido a uma tensão oscilante na interface. Essas últimas ondas retornam à superfície, como ondas planas, fazendo o ângulo i_{12} com a interface.

Ainda em relação à Figura 29, é possível observar que o ponto de intersecção entre as duas linhas de velocidade, é, obviamente, o ponto em que os tempos são iguais, e corresponde ao surgimento do contato frontal da onda na superfície do solo. A distância entre o ponto de impacto B e o ponto de intersecção é chamada de distância crítica.

Com base na distância crítica ou no tempo de interceptação T_{2i} (obtido através do prolongamento do ramo correspondente às camadas inferiores), ambos dependentes das velocidades de propagação dos meios, foram estabelecidas fórmulas matemáticas que permitem o cálculo da espessura de cada camada atravessada e, conseqüentemente da profundidade do topo da interface onde se deu a refração total.

Para o caso de duas camadas, o ângulo crítico é dado pela equação $\text{sen } i_{12} = V_1/V_2$. A profundidade da segunda camada é h_1 , assim:

a) Com base no tempo de interceptação:

A equação para o tempo de chegada T_1 das ondas diretas de superfície é:

$$T_1 = \frac{x}{V_1}$$

(Eq.10)

Esta é a equação de uma linha reta através do ponto de impacto com inclinação $1/V_1$.

Para o tempo de chegada T_2 das ondas refratadas, têm-se:

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2 h_1 \cos i_{12}}{V_1}$$

(Eq.11)

A qual é a equação de uma linha reta com inclinação $1/V_2$ e a interceptação no eixo do tempo no ponto de impacto (ou seja, quando $x = 0$), é igual a:

$$T_{2i} = \frac{2 h_1 \cos i_{12}}{V_1}$$

(Eq.12)

Assim, a equação para obtenção da espessura da primeira camada seria:

$$h_1 = \frac{T_{2i} V_1}{2 \cos i_{12}}$$

(Eq.13)

A equação mostrada anteriormente pode ser deduzida para um número ilimitado de camadas. Assim, podem-se formular para um caso geral de n camadas:

$$h_{(n-1)} = \frac{Ti V_{(n-1)}}{2 \cos i_{(n-1)n}} - \frac{V_{(n-1)}}{\cos i_{(n-1)n}} \sum_{v=1}^{v=n-2} \frac{h_v \cos i_{vn}}{V_v}$$

(Eq. 14)

b) Com base na distância crítica:

A intersecção dos dois ramos do gráfico, mostrado na Figura 29, se dá na distância crítica x_{12} , na qual $T_1 = T_2$. Assim, essa distância serve de base para o cálculo da espessura, de acordo com a equação 15 a seguir:

$$h_1 = \frac{x_{12} (1 - \sin i_{12})}{2 \cos i_{12}}$$

(Eq.15)

Para um caso geral de n camadas a equação seria a seguinte:

$$h_{(n-1)} = \frac{X_{(n-1)n}}{2} \sqrt{\frac{V_{n-} - V_{(n-1)}}{V_{n+} + V_{(n-1)}}} - \sum_{v=1}^{v=n-2} h_v \frac{\cos i_{vn} - \cos i_{v(n-1)}}{\cos i_{(n-1)n} \sin i_{v(n-i)}}$$

(Eq.16)

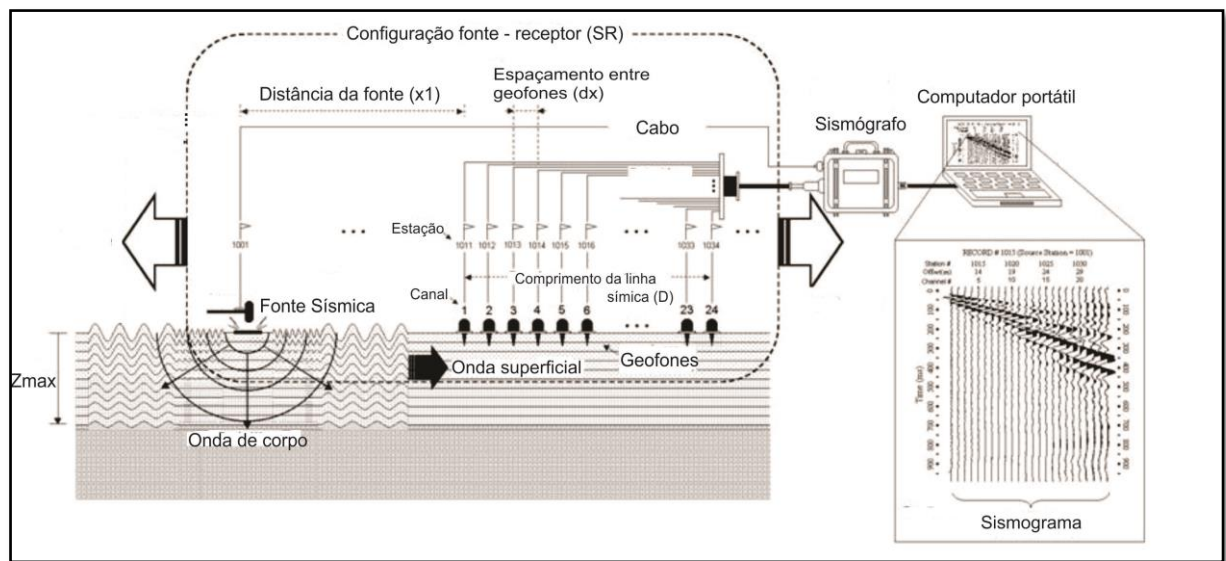
4.2.3 Análise multicanal de ondas de superfície (MASW)

A Análise Multicanal de Ondas Superficiais (MASW) é um método sísmico não invasivo e não destrutivo que permite caracterizar a subsuperfície da área de estudo através de modelos de velocidades com a inversão das curvas de dispersão, geradas a partir da análise das ondas de superfície, avaliando as condições elásticas do substrato (PARK et al., 1996).

Inicialmente o método MASW tinha como objetivo a análise de ondas Rayleigh geradas por fontes artificiais (impacto vertical e vibroseis) e registradas através de um arranjo linear de sensores de componente vertical. Posteriormente, aquisições com fontes de ruídos (sísmica passiva) que, no entanto, exigem arranjos em duas dimensões, também foram

propostas e despertaram interesse por trazerem informações de profundidades maiores através do registro de frequências mais baixas (PARK et al., 2004). Já a análise de ondas Love é pouco usada, provavelmente devido a sua maior dificuldade de execução, pois necessita de sensores com componente horizontal, que geralmente são mais caros, e fontes que gerem movimento cisalhante transversal (FOTI et al., 2017). A pesquisa ativa é o tipo mais comum, e pode ser ilustrada de acordo com a Figura 30.

Figura 30 - Arranjo de campo para pesquisa MASW.



Fonte: Modificado de MASW Data Acquisition

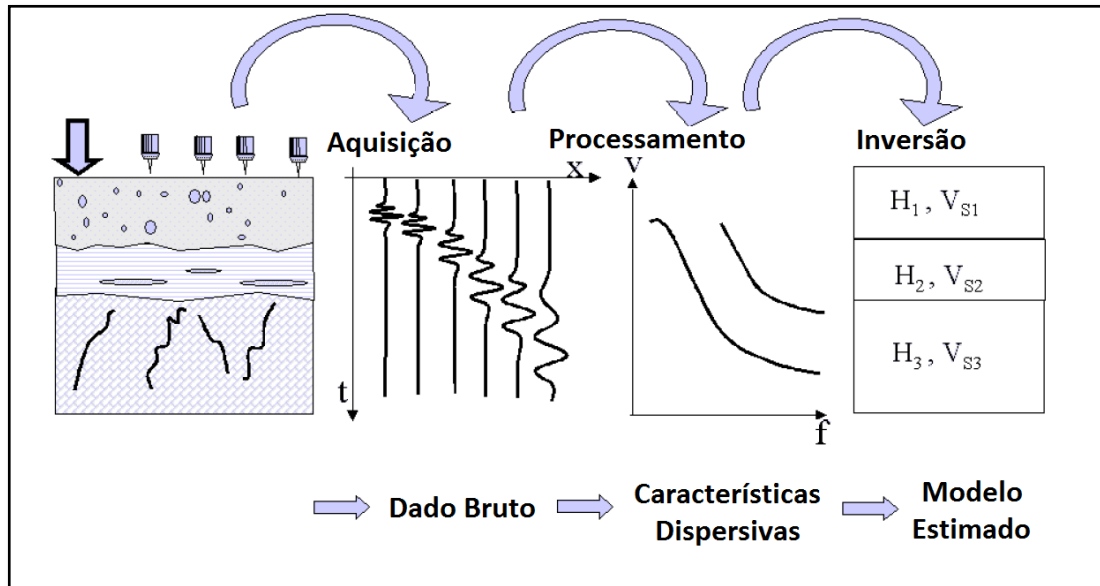
Independente dos parâmetros utilizados, o método MASW possui as seguintes etapas básicas: aquisição, processamento e inversão (Figura 31). A etapa de aquisição consiste no registro da passagem das ondas de superfície, geradas por fontes ativas ou passivas, através do arranjo de geofones, obtendo-se no final um sismograma. A profundidade máxima de investigação (Z_{max}) que pode ser alcançada pela pesquisa está na faixa de 10 a 30 metros, mas isso pode variar de acordo com o local e o tipo de fontes utilizadas. Esta profundidade será determinada pelo maior comprimento de onda (L_{max}) das ondas de superfície geradas, as quais serão determinadas pela força de impacto das fontes, pois quanto menor a frequência de onda gerada, maior será a profundidade alcançada (MASW DATA ACQUISITION, 2018).

A distância da fonte sísmica ao primeiro geofone (x_1) é de grande importância, pois controla o grau de contaminação na leitura dos dados, devido aos efeitos de campo próximo, que são um conjunto de influências adversas (por exemplo, ondas superficiais ainda não totalmente desenvolvidas) devido à fonte estar muito perto dos receptores. Assim, um valor

adequado para o posicionamento da fonte seria de no mínimo 25% do comprimento da linha de aquisição sísmica (D) e no máximo 100% (MASW DATA ACQUISITION, 2018).

Já o processamento consiste de duas etapas principais, a obtenção das curvas de dispersão das ondas, a partir do sismograma de campo, e a determinação dos perfis de velocidade da onda S. Com o auxílio de softwares específicos é possível a obtenção de um espectro (velocidade x frequência) através do qual é permitido interpretar e extrair as curvas de dispersão de cada modo visível com base nos máximos de energia. A partir das curvas são obtidos os perfis de velocidade, ou seja, os gráficos de profundidade em função da velocidade de propagação das ondas, por meio do processo de inversão. Dessa maneira, será obtido o melhor modelo de subsuperfície cuja resposta se ajusta às curvas de dispersão experimentais, permitindo caracterizar a subsuperfície da área de estudo. Assim, é possível analisar a profundidade do topo do embasamento, como também a obtenção de valores de módulos de elasticidade dinâmicos, como o módulo de Young e o módulo de cisalhamento (EIKMEIER, 2018).

Figura 31 – Esquema das etapas do método MASW.



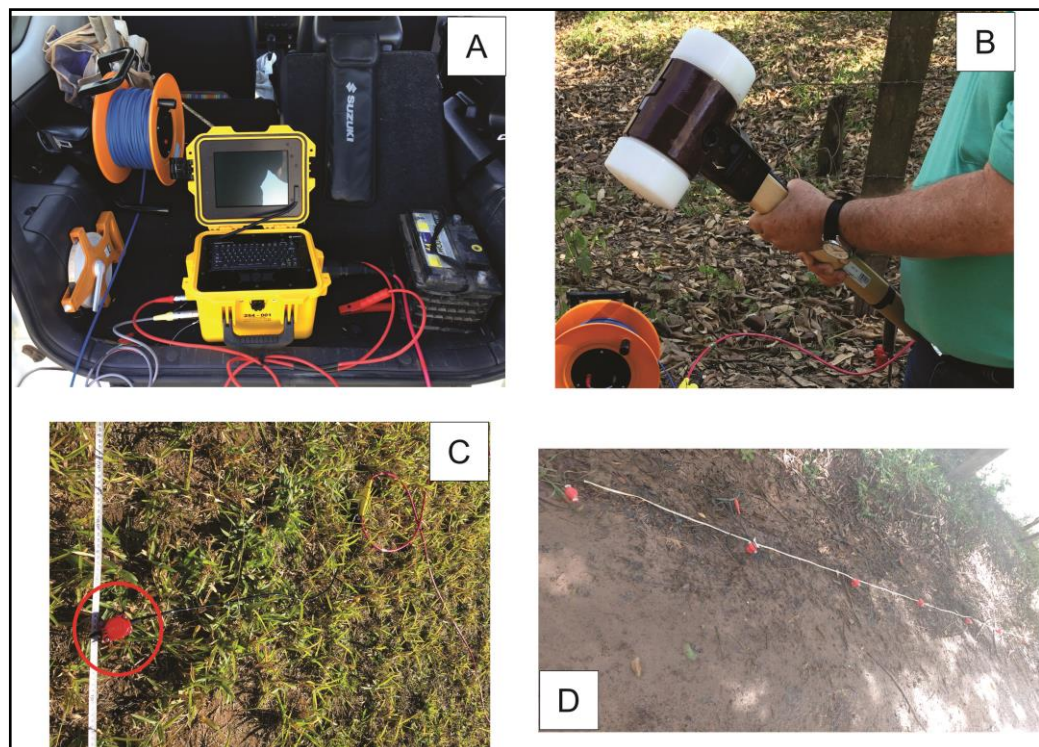
Fonte: Eikmeier (2018).

5 AQUISIÇÃO DOS DADOS

A aquisição dos dados geofísicos foi realizada em duas etapas de trabalhos de campo nas duas áreas já referidas, nos municípios de Ipeúna e Cordeirópolis. Inicialmente foi realizado o reconhecimento das áreas das barragens, o que permitiu a análise das condições fisiográficas e a determinação do número de linhas de levantamento geofísico.

Todos os equipamentos e materiais utilizados em campo foram disponibilizados pelo Laboratório de Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus Rio Claro, sendo eles o sismógrafo SUMMIT X Stream Pro da DMT, geofones de 4,5 Hz, fonte de ondas (martelo sísmico) e demais acessórios (cabos, baterias, etc) (Figura 32).

Figura 32 – Equipamentos utilizados em campo; (A) Sismógrafo SUMMIT X Stream Pro e demais acessórios; (B) martelo sísmico; (C) geofone; (D) representação da linha de aquisição sísmica com geofones.



Fonte: Fotos obtidas pela equipe de campo.

Como previsto no plano de atividades, o emprego dos métodos sísmicos contemplou a sísmica de refração, com aquisição e processamento tomográfico (SCHUSTER & QUINTUS-BOSZ, 1993 e SHEEHAN et al., 2005) e a análise da dispersão de ondas superficiais, no procedimento *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) (PARK et al., 1999 e EAGE, 2014).

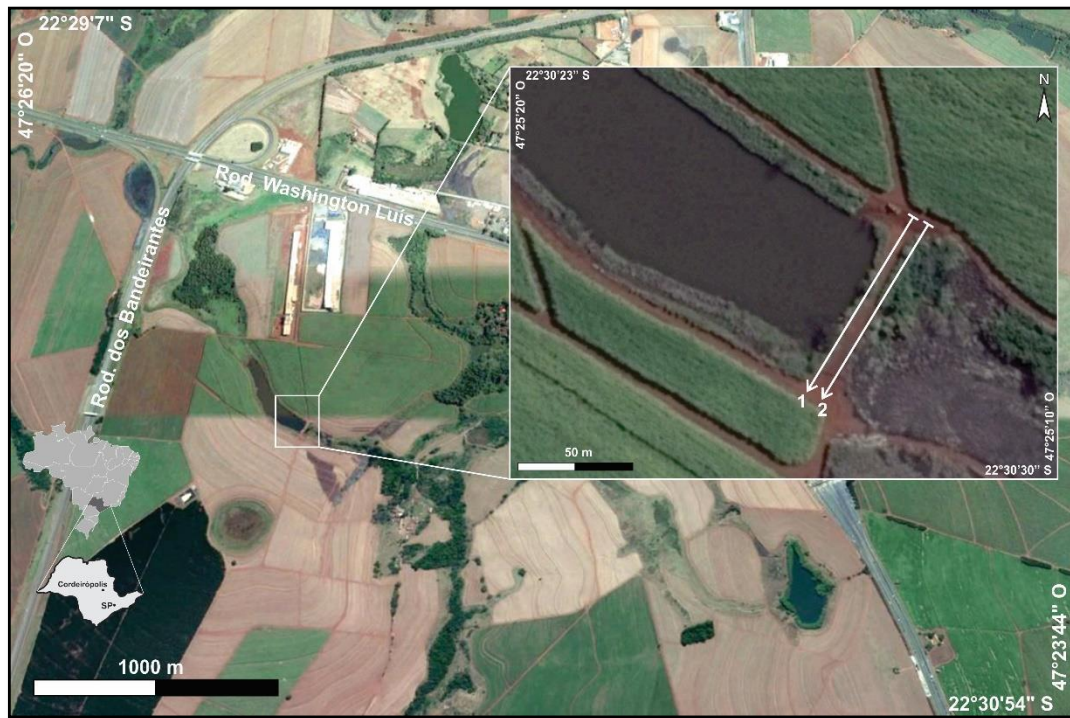
Na primeira etapa de campo, em ambas as técnicas, foram levantadas 2 linhas de aquisição sísmica, paralelas entre si, de 94 metros de comprimento cada, totalizando 188 metros de levantamento nas barragem de Ipeúna e Cordeirópolis (Figuras 33 e 34). O espaçamento utilizado entre os geofones foi de 2 metros. As linhas foram dispostas no eixo da barragem, estando a linha 1 localizada próxima à montante e a linha 2 próxima à jusante.

Figura 33 - Localização das linhas de aquisição sísmica na barragem de Ipeúna/SP (etapa 1).



Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Figura 34 - Localização das linhas sísmicas na barragem de Cordeirópolis/SP (etapa 1).



Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Após o processamento e análise dos primeiros resultados, optou-se pela realização de novos ensaios nas duas barragens. Com isso, na segunda etapa, houve a recuperação das linhas 1 de ambas, visando a obtenção de um melhor detalhamento das eventuais anomalias. Foi empregado, então, espaçamento de 1 metro entre os geofones. Na barragem de Cordeirópolis, evitou-se o vertedouro existente no local, o que ocasionou uma melhora aparente da seção sísmica. Além disso, especificamente para os ensaios de refração, foram utilizados geofones com frequência de ressonância de 10 Hz, também pertencentes ao Laboratório de Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia Aplicada (DGA), mantendo-se os de 4,5 Hz para os ensaios de MASW. Assim, a linha sísmica adquirida na barragem de Cordeirópolis teve uma extensão total de 72 metros, enquanto na barragem de Ipeúna foi realizada uma linha com 96 metros de comprimento (Figuras 35 e 36).

Figura 35 - Localização da linha sísmica na barragem de Cordeirópolis/SP (etapa 2).



Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Figura 36 - Localização da linha sísmica na barragem de Ipeúna/SP (etapa 2).



Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

6 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados sísmicos registrados em campo foram armazenados na memória do sismógrafo SUMMIT X Stream Pro da DMT em um arquivo formato .SG2. Após a transferência, via USB, para um computador, o arquivo de dados foi analisado e editado através dos *softwares* Rayfract 3.35 e Seisimager 2.9.1.9. Cada um dos *softwares* possui algoritmos próprios para a geração de modelos de interpretação, porém sempre partindo do mesmo princípio de leitura dos tempos das primeiras chegadas das ondas sísmicas captadas pelos geofones. Assim, a seguir são apresentados as principais características de cada *software*, e como cada um trabalha com os dados de sísmica de refração e MASW.

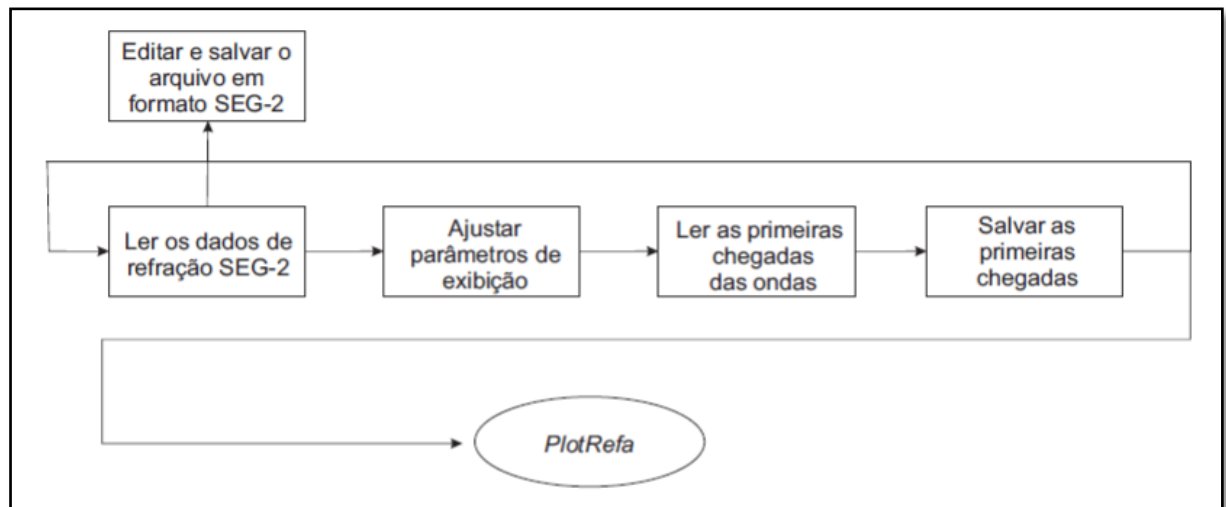
6.1 Software SeisImager

O *software SeisImager* consiste em um pacote de programas utilizados para leitura e interpretação dos dados obtidos pela sísmica de refração e pela análise de ondas superficiais, e pode ser dividido em quatro módulos. Os módulos individuais são denominados de: *PickwinTM*, *PlotrefaTM*, *WaveEqTM* e *GeoPlotTM*. O módulo *WizardTM* não é um módulo separado, porém é utilizado apenas dentro de funções específicas do *Pickwin*, *WaveEq* e *GeoPlot*. Para o caso deste trabalho foram utilizados apenas os módulos *Pickwin*, *Plotrefa* e *WaveEq*.

6.1.1 Análise dos dados de refração sísmica

Para a análise das ondas refratadas são utilizados os módulos *Pickwin* e *Plotrefa*. O primeiro é utilizado para a leitura das primeiras chegadas das ondas sísmicas, enquanto o segundo é utilizado para análise dos dados obtidos pelo *Pickwin*. Dentro do *Pickwin* é possível reconhecer a chegada das ondas; editar sua aparência, filtrando-os, alterando os ganhos, escalas, estilo do traçado; além de corrigir erros de temporização. Após a otimização desses dados, o programa escolhe automaticamente as primeiras chegadas de ondas, as quais podem ser ajustadas conforme necessidade. Cada arquivo de dados para cada geofone é lido separadamente, e posteriormente salvos em formato SEG-2 para serem analisados em conjunto pelo *Plotrefa*. A seguir é apresentado o fluxo de etapas a serem realizadas dentro do módulo *Pickwin* para sísmica da refração (Figura 37).

Figura 37 - Fluxo de etapas a serem realizadas dentro do módulo *Pickwin*, para a sismica de refração.



Fonte: Modificado de *SeisImager 2D Manual* (2009).

O módulo *Plotrefa* é responsável pela interpretação dos dados de saída obtidos no *Pickwin*, através de técnicas que fornecem seções transversais de velocidade. Ao abrir os dados no módulo, já é fornecido um gráfico tempo x distância, que representa o tempo de chegada das primeiras ondas em cada geofone. Com ele é possível observar se as leituras feitas anteriormente estão corretas, e caso necessário fazer pequenas alterações.

O *SeisImager* oferece dentro do *Plotrefa* três técnicas de inversão para obtenção das seções de velocidade: o método *time-term*, o método recíproco e a tomografia. Para este estudo o método utilizado foi o da tomografia, o qual será abordado a seguir.

A inversão tomográfica inicia-se com a proposição de um modelo inicial de distribuição da velocidade, o qual deve ser baseado em parâmetros que melhor se encaixam em cada área de estudo, como profundidade e número das camadas, velocidades máxima e mínima e elevação. Esse modelo vai sendo modificado por meio de novos traçados dos raios sísmicos de forma interativa, com o objetivo de minimizar o erro entre os dados observados e aqueles calculados nas curvas de tempo x distância. O objetivo essencial é encontrar o tempo mínimo de viagem entre a fonte e o receptor para cada par origem-receptor. Essa inversão é geralmente utilizada quando os contrastes de velocidade são conhecidos por serem mais gradacionais do que abruptos, quando há pequenas variações de velocidade (SEISIMAGER 2D MANUAL, 2009).

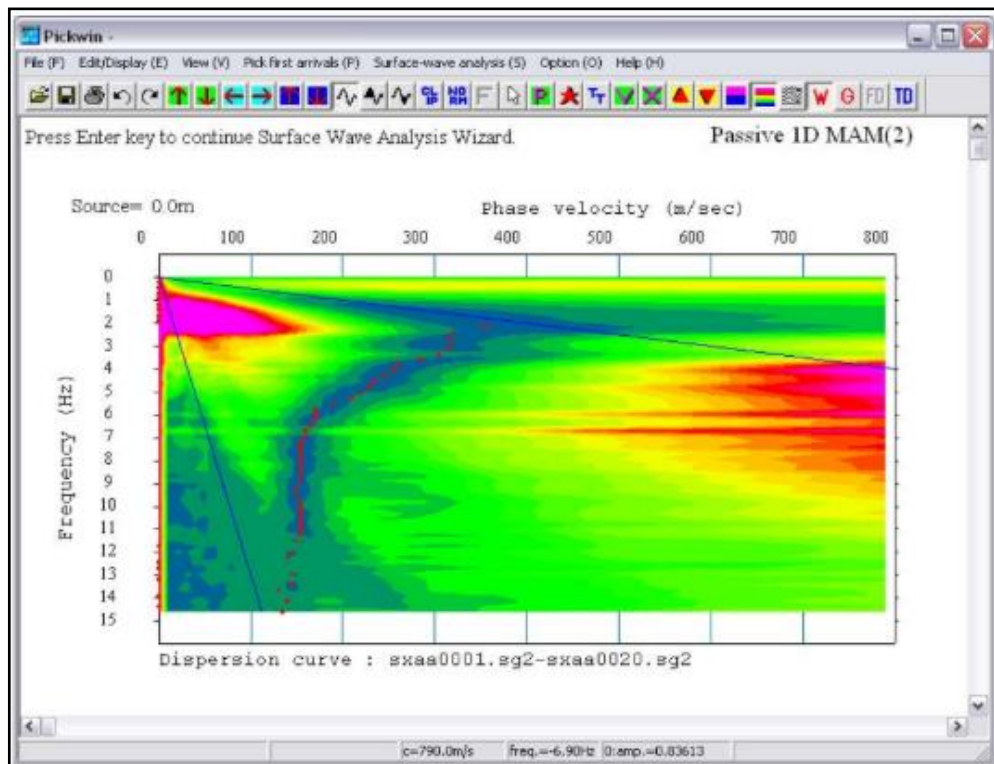
6.1.2 Análise de dados de MASW

Para execução da análise multicanal de ondas superficiais (MASW), os módulos utilizados são o *Pickwin* (sendo este acessado através do módulo *WizardTM*) e o *WaveEq*. O módulo *WizardTM* permite três tipos de processamento dos dados: 1D para fontes ativas e passivas, dados de fontes passivas de microtremores e 2D também para fontes ativas. As opções de processamentos são apresentadas já com a abertura do módulo, e deve ser escolhido o que melhor se aplica para a área de estudo. No caso desse trabalho foi utilizado o módulo 1D para fontes ativas, o qual será explicado a seguir.

Após escolher o tipo de processamento, a janela de entrada do módulo *Pickwin* é apresentada com o menu de análise de ondas de superfície sendo exibido. Assim, é necessário abrir o arquivo de MASW gerado em campo, com o qual é possível gerar o sismograma de tempo x distância. Nesta etapa é possível modificar as unidades de medidas a serem utilizadas no processamento, o que pode ser feito acessando a aba *Geometry*, na qual também é possível corrigir as coordenadas dos dados, se for o caso. Em seguida, é necessário que os parâmetros para os cálculos de velocidade de fase sejam definidos, se adequando a parâmetros esperados para a área. Também devem ser definidos os parâmetros para escolha das amplitudes máximas, as quais definem a curva de dispersão que será gerada. O valor padrão para a frequência mínima é de 5 Hz, quando são utilizados geofones de 4 Hz, que foi o caso deste trabalho.

Uma vez concluídos os cálculos, é gerado um gráfico de frequência x velocidade de fase, no qual é exibido automaticamente as amplitudes, sendo as amplitudes máximas representadas por pontos vermelhos (Figura 38), a partir das quais é gerada a curva de dispersão. Caso necessário ajuste dessas amplitudes, ele deve ser feito manualmente com o auxílio do mouse. Finalmente a curva de dispersão é salva, para posteriormente ser interpretada pelo módulo *WaveEq* (SEISIMAGER/SW MANUAL, 2009).

Figura 38 - Gráfico frequência x velocidade de fase gerado no módulo *Pickwin* exibindo as amplitudes máximas da área.



Fonte: SeisImager/SW Manual (2009).

A curva de dispersão é então aberta dentro do módulo *WaveEq*. Normalmente, há picos ruidosos nas extremidades de baixa e alta frequência da curva, além de alguns valores discrepantes, que podem ser suavizados com o auxílio do menu *Dispersion curves » Smoothing (individual curves)*. Finalmente, um modelo inicial de distribuição de ondas S em relação à profundidade pode ser gerado. A configuração padrão do software é calcular o modelo inicial a partir da aproximação de um terço de comprimento de onda. Com o modelo inicial é feita a inversão, de acordo com o número de interações mais indicado para convergir no melhor ajuste do modelo inicial, e é então gerado o modelo de distribuição de ondas S em relação à profundidade.

6.2 Software *Rayfract*

O software *Rayfract* permite gerar um modelo de velocidade 2D de subsuperfície, através da inversão de dados do tempo das primeiras chegadas de ondas sísmicas em cada

geofone, baseado no método de tomografia *Wavepath Eikonal Traveltime* (WET). As equações que baseiam esse método são obtidas a partir das equações de ondas elásticas e fornecem o tempo em que ocorreram as primeiras chegadas, o que o torna bastante adequado para a interpretação de dados sísmicos de refração (LECOMTE et al., 2000).

Inicialmente é necessário editar um arquivo dentro do *software*, informando parâmetros, como a distância entre os geofones e a posição de início de cada perfil. Posteriormente, os dados de sísmica de refração em formato *.SEG2*, devem ser importados para o programa e processados separadamente, de acordo com a posição de início de cada perfil, a distância do tiro em relação ao geofone anterior ou posterior, etc. A partir do processamento, é gerado um sismograma, com o qual é possível fazer a leitura das primeiras chegadas de ondas em cada geofone. Na sequência, são gerados gráficos de tempo x distância, com os quais é possível observar se as leituras de tempo realizadas estão coerentes.

Para o aproveitamento máximo das possibilidades de inversão tomográfica, a cobertura de dados deve ser alta, de preferência de 7-8 pontos de tiro em um conjunto de 24 geofones. Além disso, os diferentes arranjos de geofones devem se sobrepor para evitar baixa cobertura de dados nos limites.

Assim, após a leitura das primeiras chegadas é realizada uma primeira inversão suave a partir do menu *Smooth invert » WET with 1D-gradient initial model* que gera um modelo inicial apresentado no *software SurferTM*. Na sequência são calculadas e apresentadas as áreas de cobertura dos raios sísmicos em relação à profundidade, que fornecem informações sobre a confiabilidade do modelo de velocidade. O produto final é a seção tomográfica (tomograma) do local, que apresenta a distribuição das velocidades de propagação das ondas sísmicas encontradas em cada meio. Esses dados são gerados a partir de número de interações realizados pela inversão (o programa normalmente estabelece o número 20 como padrão, entretanto este valor pode ser alterado conforme necessário).

As vantagens da técnica WET são a rapidez, automatização e a possibilidade de uso de todos os dados de tempos de chegada de ondas na criação do modelo de velocidade. O controle de qualidade é baseado em estatísticas independentes tais como números de incerteza, gráficos de cobertura de raios e parâmetros de ajuste do modelo (RAYFRACT MANUAL, 2006).

7 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

De acordo com os dados obtidos durante os trabalhos de campo, os resultados de cada uma das barragens analisadas e para cada um dos softwares utilizados são apresentados na forma de gráficos e seções tomográficas, os quais serão analisados e comparados. Em uma primeira abordagem serão apresentados os resultados geofísicos de refração sísmica, e na sequência os dados geofísicos de MASW.

7.1 Sísmica de Refração

7.1.1 Barragem de Cordeirópolis

Na barragem de Cordeirópolis, os resultados de refração sísmica se mostram de boa qualidade, permitindo o processamento e cálculo de seções sísmicas preliminares. Nas duas etapas de campo foram obtidos sismogramas típicos da área, nos quais podem ser observadas as primeiras chegadas das ondas sísmicas em cada um dos geofones. Uma vez determinados esses parâmetros, foram construídos gráficos de tempo x distância, a partir dos quais foi possível a determinação das velocidades das camadas, e elaboradas as seções sísmicas tomográfica representante da área.

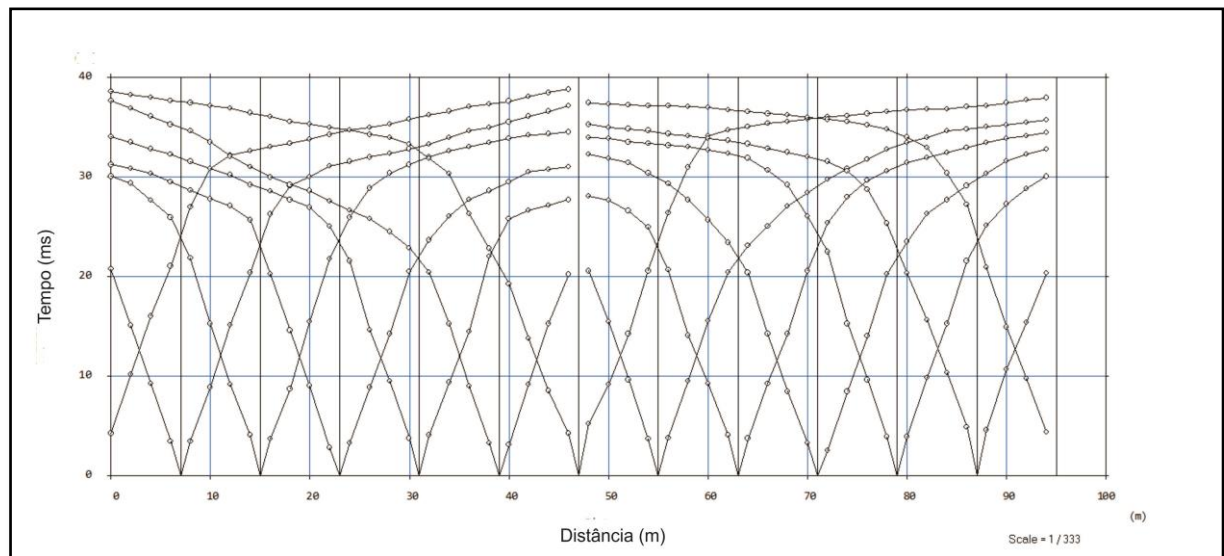
7.1.1.1 Primeira etapa de campo

Na primeira etapa de campo, os ensaios sísmicos foram executados em duas linhas sísmicas de 24 geofones, espaçados de 2 metros entre si, ligadas em sequência (Figura 34). Como os resultados para as duas linhas se mostraram praticamente iguais, apenas os dados da linha 1 (compatível com a linha sísmica da segunda etapa de campo) serão apresentados.

Para a elaboração das seções sísmicas no *software SeisImager* foram utilizados os tempos de percurso da onda longitudinal de 14 tiros sísmicos de cada linha, espaçados de 8 metros entre si.

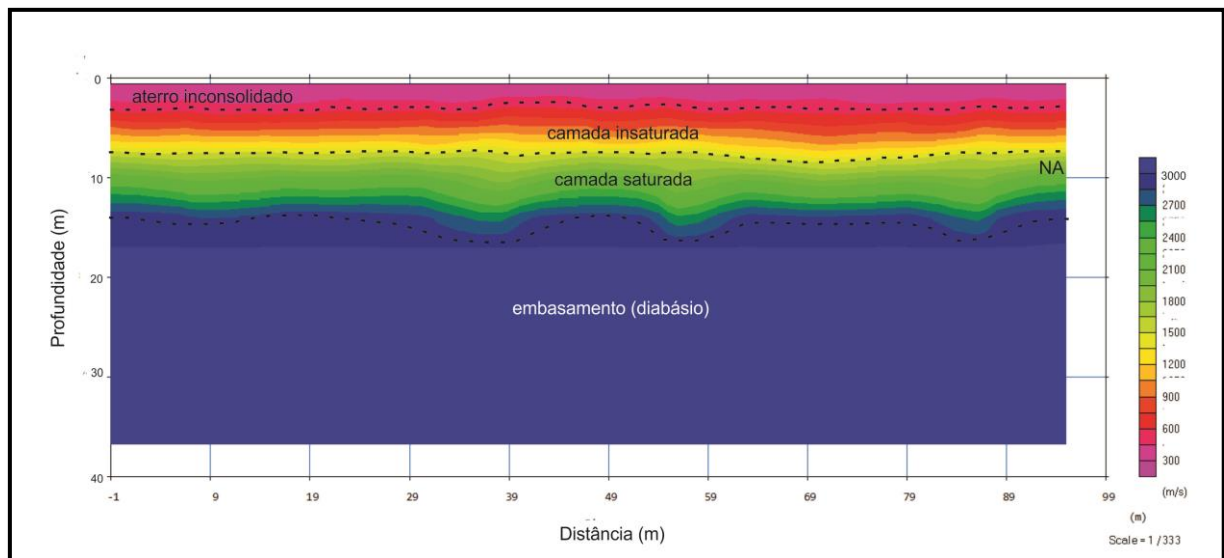
Na Figura 39 são apresentados os gráficos tempo x distância, da Linha 01 da barragem. Na Figura 40, é mostrada, na forma de imagem tomográfica, a distribuição das velocidades com a profundidade na linha.

Figura 39 - Gráficos de tempo x distância para a linha 1 obtida na barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 40 - Seção sísmica da linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP a partir do *software* *SeisImager*.

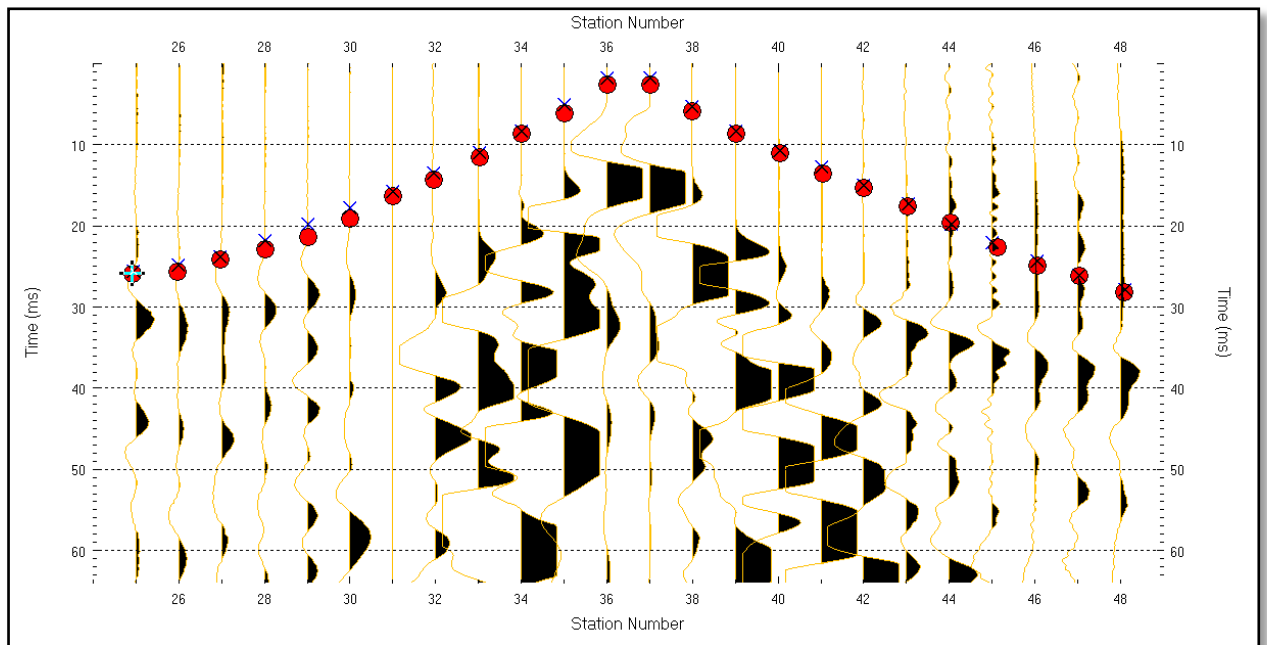


Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Já em relação aos resultados obtidos pelo *software* *Rayfract*, os mesmos são relativos às análises também realizadas a partir da linha 1 de aquisição sísmica, entretanto, todos os tiros foram considerados para geração dos resultados. Com isso, foi possível obter um

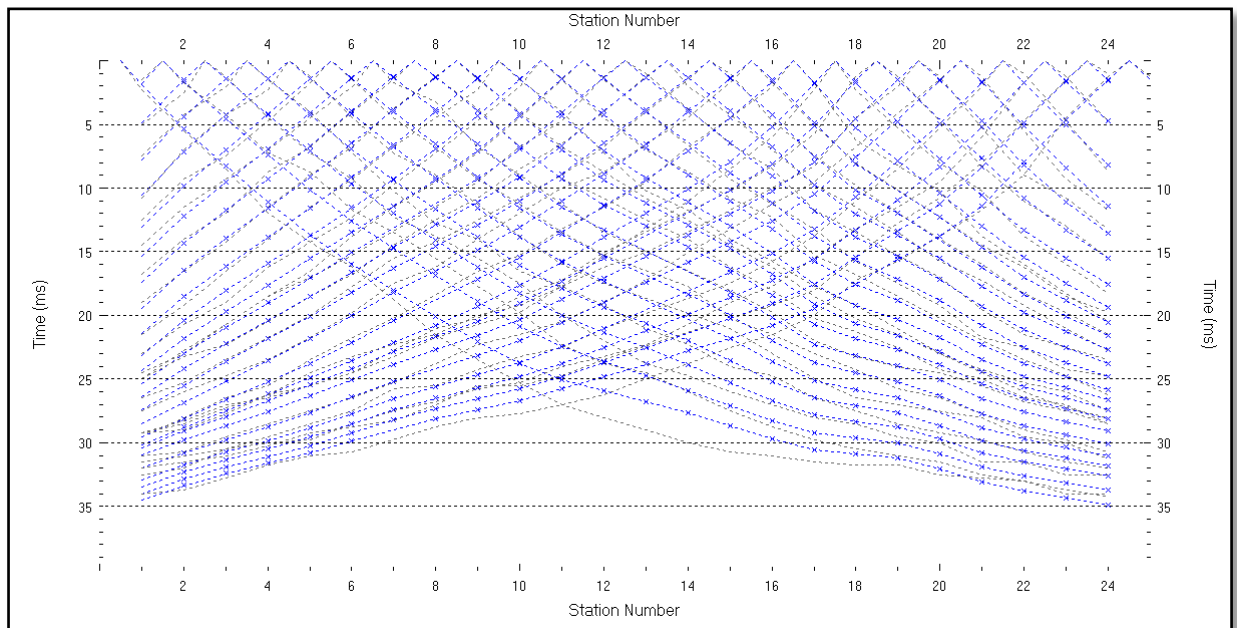
sismograma típico para a área, nos quais podem ser visualizadas as primeiras chegadas das ondas sísmicas em cada um dos geofones, nas quais é baseado o método da sismica de refração (Figura 41). Dos gráficos de tempo x distância elaborados foi possível a determinação da velocidade das camadas (Figura 42); uma análise das áreas de cobertura dos raios sísmicos em relação a profundidade, fornecendo informações para a confiabilidade do modelo de velocidade (Figura 43); e a seção sísmica tomográfica relativa à área sob a linha 1 (Figura 44). Neste caso o número de interações utilizado para obtenção das seções tomográficas foi de 20.

Figura 41 - Sismograma típico obtido para a linha 1 na barragem de Cordeirópolis/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos).



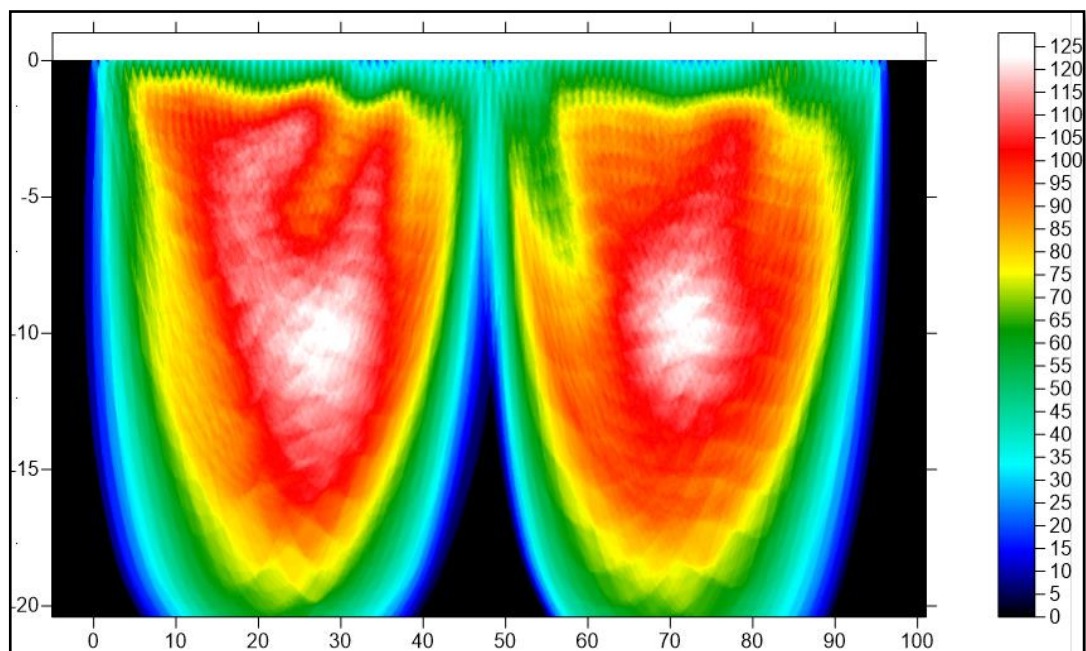
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 42 – Conjunto de gráficos tempo x distância dos tiros executados na linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP.



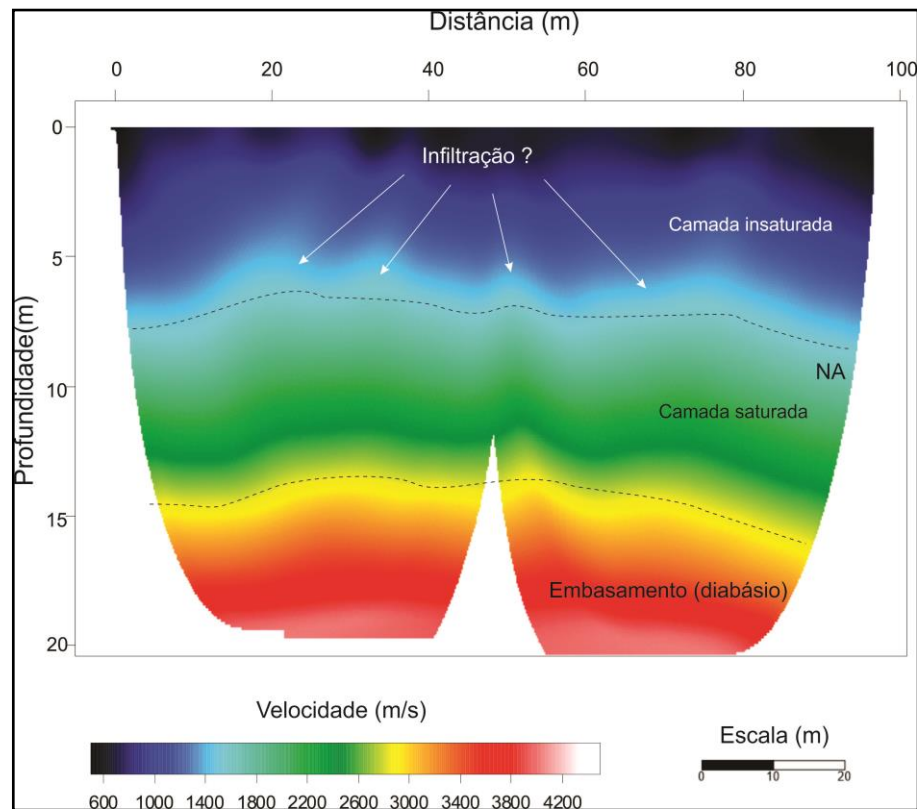
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 43 - Área de cobertura dos raios sísmicos para a linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 44 - Seção tomográfica obtida para a linha 1 da barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Como pode ser observado, os dois softwares possibilitaram a identificação das camadas que estruturam o corpo da barragem, permitindo a identificação das camadas saturada e insaturada, topo do embasamento, além do nível d'água na região. Entretanto, o software Rayfract apresenta maior detalhamento, sendo possível observação de zonas de velocidades correlacionáveis à presença de água no meio insaturado sugerindo a ocorrência de possíveis zonas de infiltração.

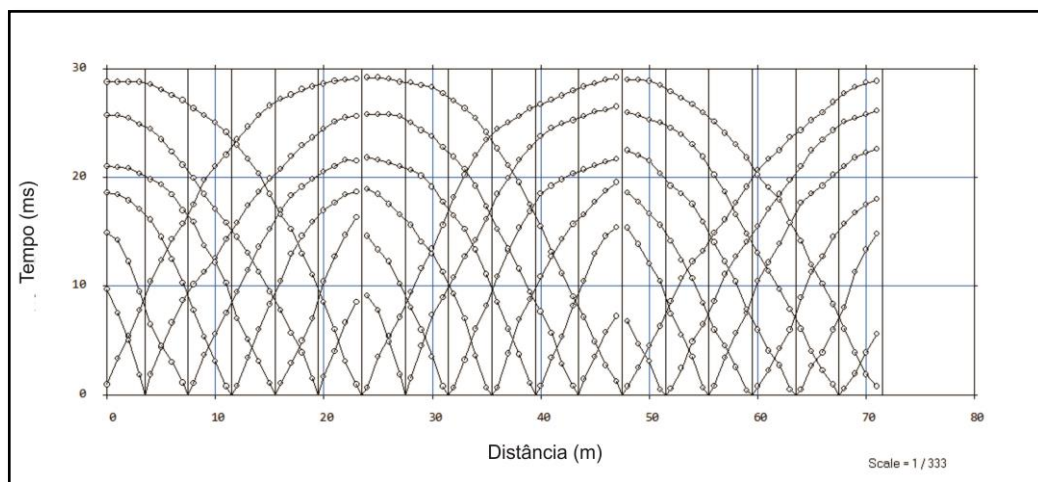
7.1.1.2 Segunda etapa de campo

Na segunda etapa de trabalho de campo, os arranjos de geofones foram alterados, sendo realizada apenas uma linha de aquisição sísmica (com 3 bases de 24 geofones) ao longo do corpo da barragem, além da distância entre os geofones ter sido diminuída para 1 metro (Figura 35). Como na primeira etapa, os dados foram analisados com o auxílio dos softwares *SeisImager* e *Rayfract*.

Para a elaboração da seção sísmica no *software Seisimager* foram utilizados os tempos de percurso da onda longitudinal de 21 tiros sísmicos obtidos ao longo da linha sísmica, sendo 7 para cada base de 24 geofones, os quais estavam espaçados 4 metros entre si.

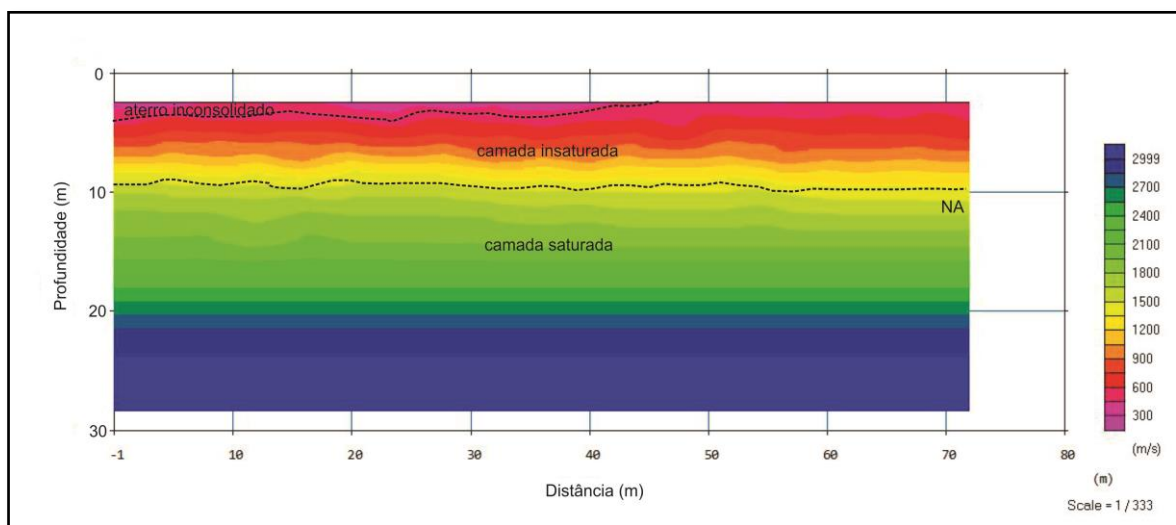
Assim, na Figura 45 é apresentado o conjunto de gráficos tempo x distância, obtidos nos ensaios nessa barragem. Já na Figura 46, é mostrada, na forma de seção, a distribuição das velocidades com a profundidade na linha.

Figura 45 - Gráficos de tempo x distância obtido para a área da barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

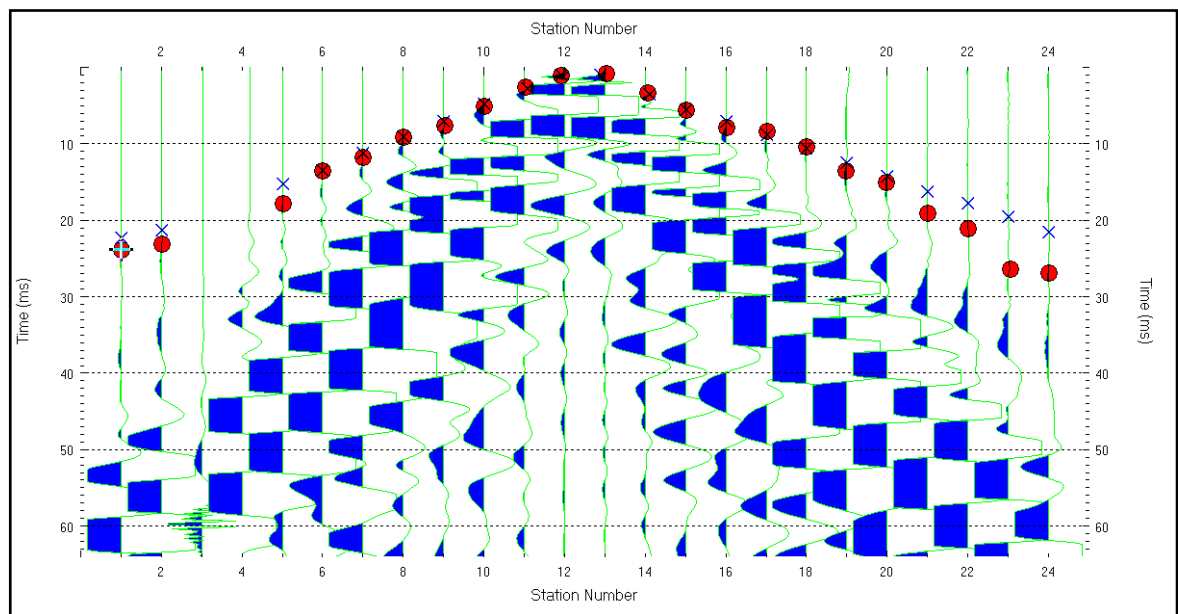
Figura 46 - Seção sísmica para a barragem de Cordeirópolis/SP a partir do *software SeisImager*.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

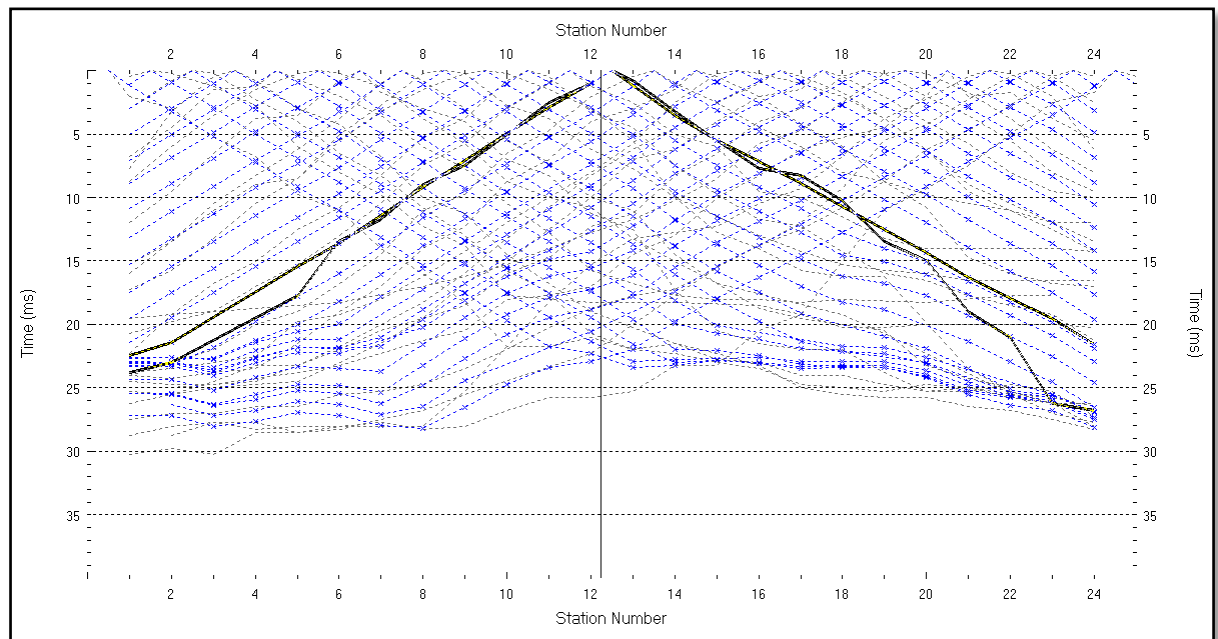
Para a geração dos resultados no *software Rayfract* todos os tiros realizados ao longo da linha sísmica foram considerados. Observa-se na Figura 47 um sismograma típico da área, editado nesse *software*, com indicação das primeiras chegadas de ondas. O conjunto de gráficos de tempo x distância (Figura 48), a representação da área de cobertura dos raios sísmicos em relação à profundidade (Figura 49), e finalmente a seção sísmica tomográfica obtida na da área (Figura 50) também são mostrados.

Figura 47 - Sismograma típico obtido para a barragem de Cordeirópolis/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos).



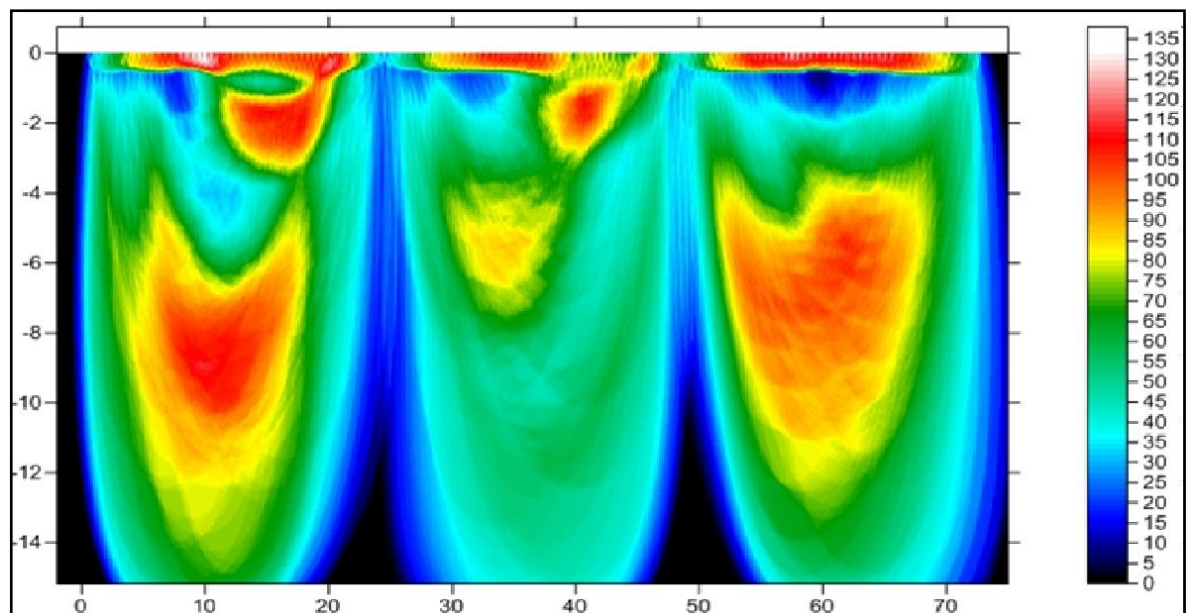
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 48 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da barragem de Cordeirópolis/SP.



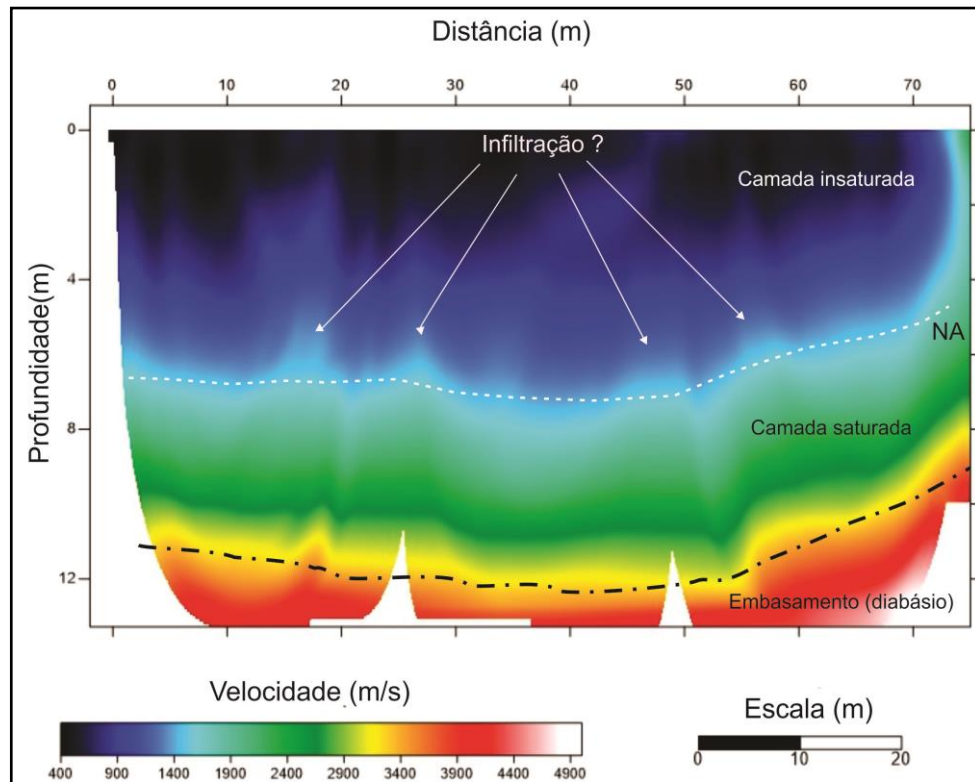
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 49 - Área de cobertura dos raios sísmicos na barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 50 - Seção tomográfica representante da barragem de Cordeirópolis/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Com os resultados obtidos na segunda etapa, foi possível visualizar uma melhora das seções, no sentido de se observar uma maior presença de zonas de velocidades correlacionáveis à presença de água no meio insaturado, o que vem sendo interpretado, nesse estudo, como ocorrência de infiltrações ao longo do corpo da barragem. Além disso, o zoneamento geológico-geotécnico na estrutura da barragem e o nível d'água também podem ser interpretados, com base na variação das velocidades sísmicas. Para melhor comparação, o número de interações utilizadas para o processamento da inversão também foi de 20 para a segunda etapa.

7.1.2 Barragem de Ipeúna

Diferentemente da barragem de Cordeirópolis, os dados sísmicos de refração obtidos na barragem de Ipeúna tiveram uma qualidade inferior. A energia gerada para a identificação das primeiras chegadas das ondas longitudinais, referentes à onda refratada, mostrou-se pequena para o arranjo empregado, gerando, em um primeiro momento, algumas incertezas na

sua identificação. Atribui-se também, para esse fato, o uso de geofones de 4,5 Hz, ótimos para o registro de ondas superficiais, mas que estariam dificultando o registro das ondas longitudinais refratadas nessa área.

Mesmo assim, também foi possível a determinação de seu sismograma típico, gráficos de tempo x distância para determinação da velocidade das camadas e a seção sísmica tomográfica representante da área.

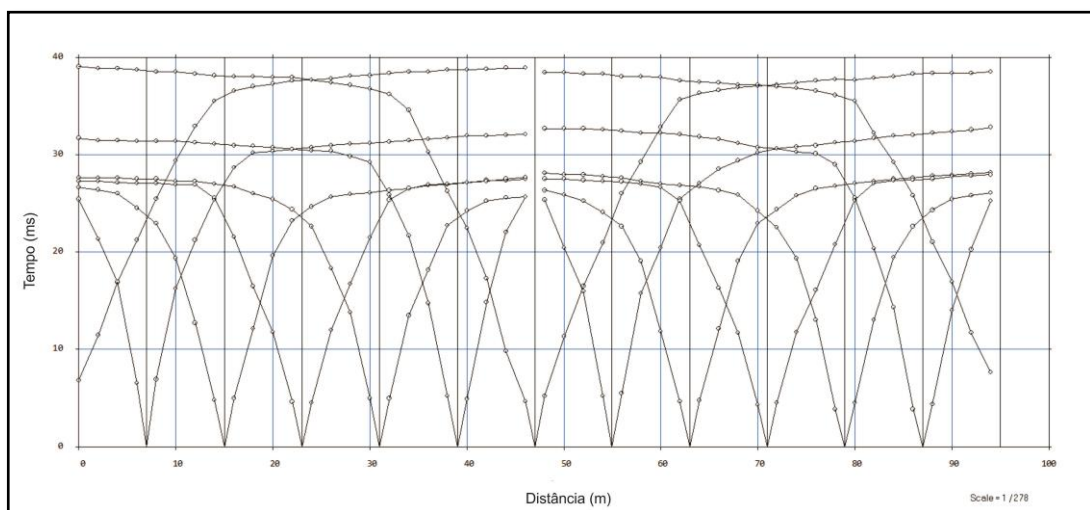
7.1.2.1 Primeira etapa de campo

Na primeira etapa de campo, a aquisição dos dados foi realizada a partir de duas linhas sísmicas de 24 geofones, espaçadas de 2 metros entre si, ligadas em sequência (Figura 33). Novamente, como os resultados para as duas linhas se mostraram praticamente iguais, apenas os dados da linha 1 (compatível com a linha sísmica da segunda etapa de campo) serão apresentados.

Assim como utilizado para elaboração das seções sísmicas da barragem de Cordeirópolis, com software *Seisimager* foram utilizados os tempos de percurso da onda longitudinal de 14 tiros sísmicos, espaçados de 8 metros entre si.

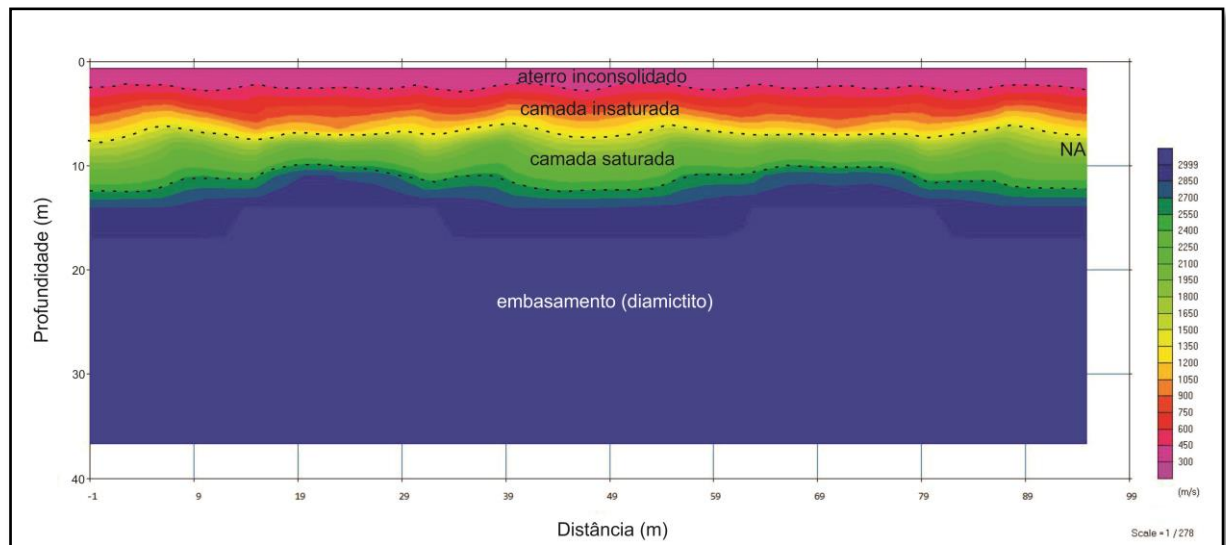
Na Figura 51 são mostrados os gráficos tempo x distância da Linha 01 sobre a barragem, enquanto na Figura 52 é representada, na forma de seção, a distribuição das velocidades a partir da profundidade.

Figura 51 – Conjunto de gráficos de tempo x distância para a linha 1 obtida na barragem de Ipeúna/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

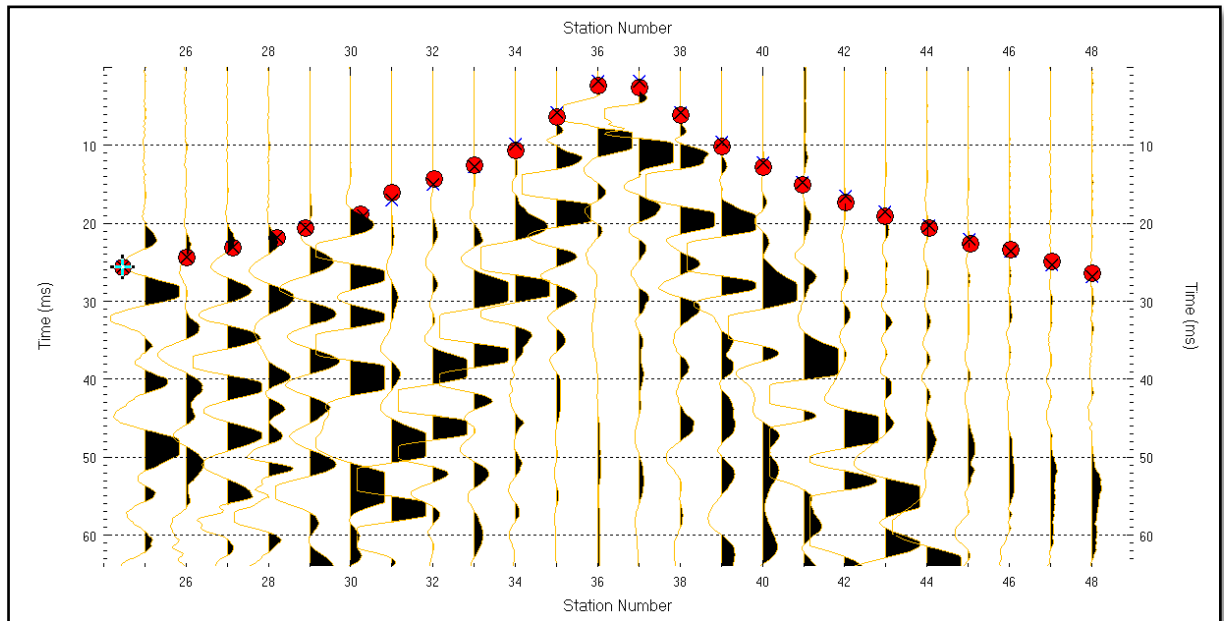
Figura 52 - Seção sísmica da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP, a partir do *software SeisImager*.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

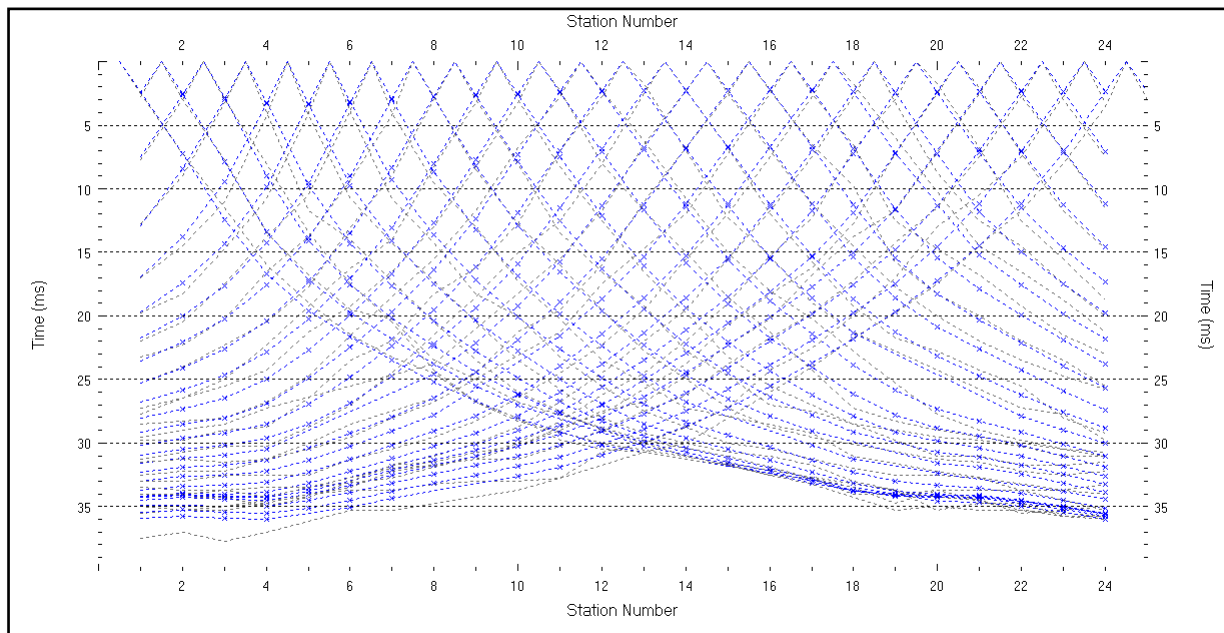
Com o auxílio do *software Rayfract* todos os tiros realizados ao longo da linha 1 foram considerados para a geração das seções sísmicas. Na Figura 53 pode-se visualizar um sismograma típico para a área, onde estão marcados os tempos das primeiras chegadas das ondas sísmicas em cada um dos geofones. O conjunto de gráficos de tempo x distância, dos quais foram determinadas velocidades das camadas é mostrado Figura 54. A representação das áreas de cobertura dos raios sísmicos em relação a profundidade, fornecendo informações para a confiabilidade do modelo de velocidade é vista na Figura 55. E, finalmente, e a seção sísmica tomográfica relativa à área sob a linha está mostrada na Figura 56. Neste caso o número de interações utilizado para obtenção das seções tomográficas foi 10.

Figura 53 - Sismograma típico obtido para a linha 1 da barragem de Ipeúna/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos).



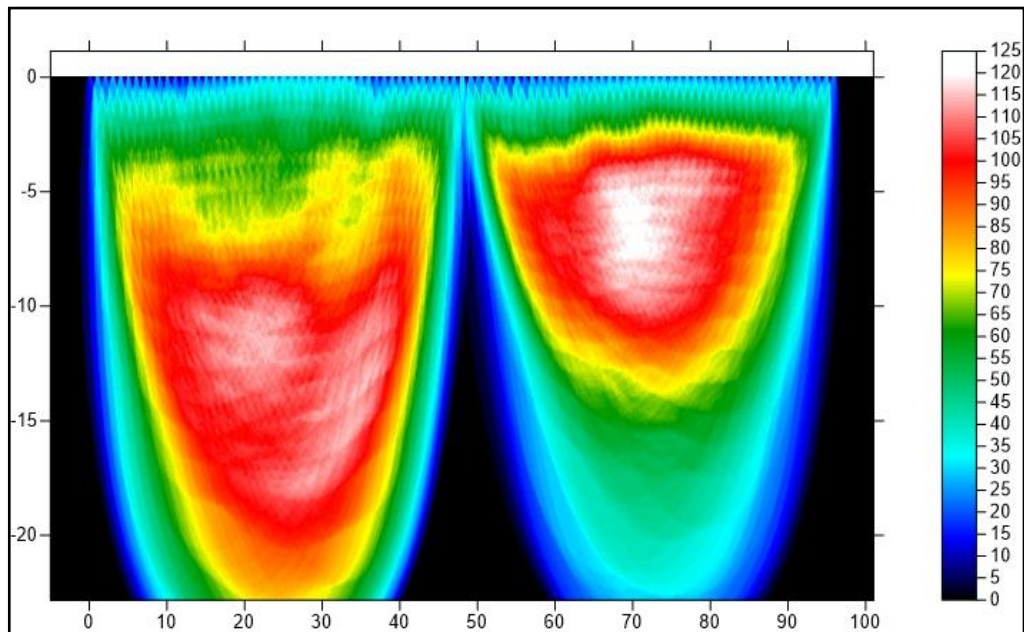
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 54 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP.



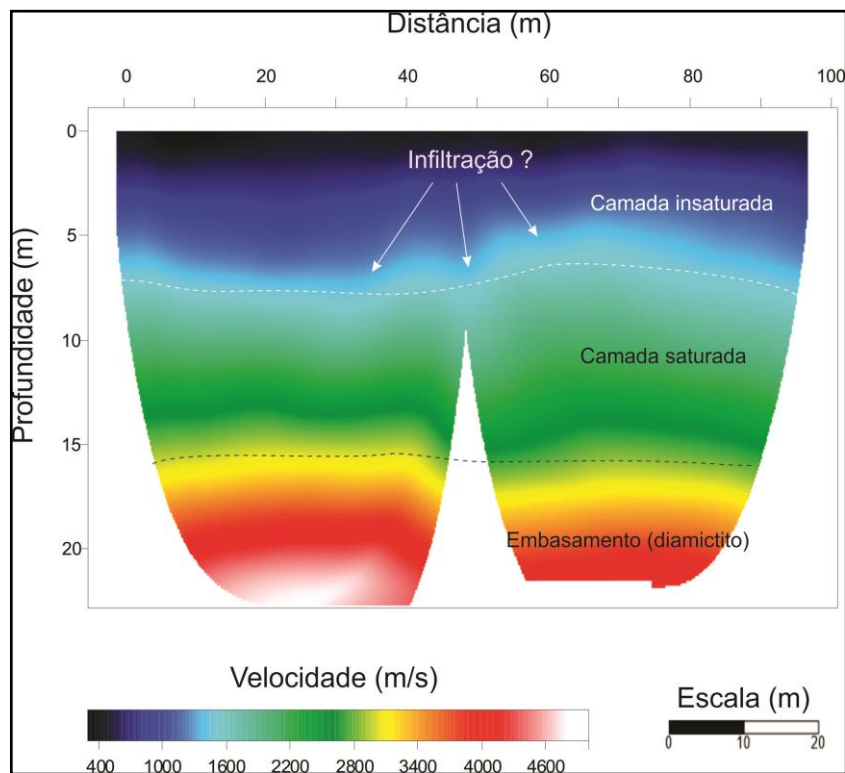
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 55 - Área de cobertura dos raios sísmicos na linha 1 da barragem de Ipeúna/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 56 - Seção tomográfica representante da linha 1 da barragem de Ipeúna/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

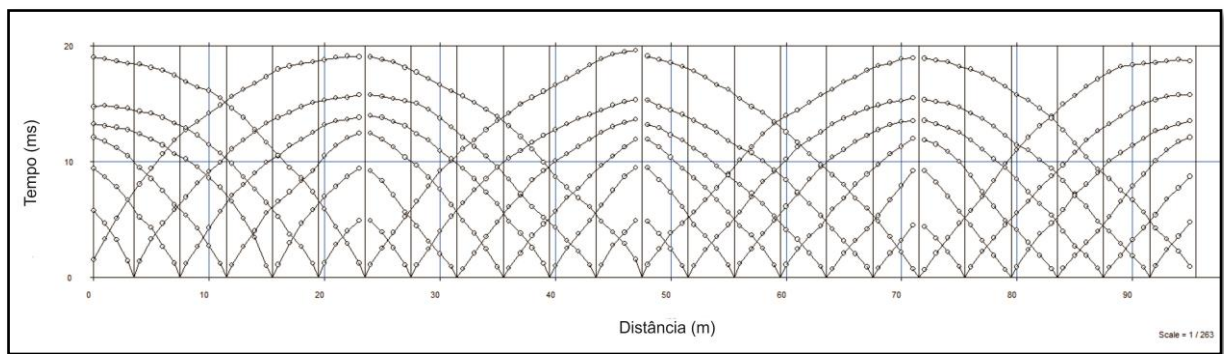
Os resultados obtidos na barragem de Ipeúna também possibilitaram a identificação das camadas que estruturam o corpo da barragem, com identificação das camadas saturada e insaturada, topo do embasamento, além do nível d'água na região. Mesmo o detalhamento do software *Rayfract* sendo melhor, não é possível afirmar se há zonas de infiltração no corpo da barragem, com a variação do nível freático da região podendo ser explicada pelas variações litológicas características do Grupo Itararé.

7.1.2.2 Segunda etapa de campo

Diferentemente da barragem de Cordeirópolis, a segunda etapa do trabalho de campo foi realizada sobre apenas uma linha de aquisição sísmica (com 4 bases de 24 geofones) ao longo do corpo da barragem, além da distância entre os geofones ter sido diminuída para 1 metro, visando um aumento na resolução. Os dados obtidos também foram analisados e processados com o auxílio dos softwares *Seisimager* e *Rayfract*.

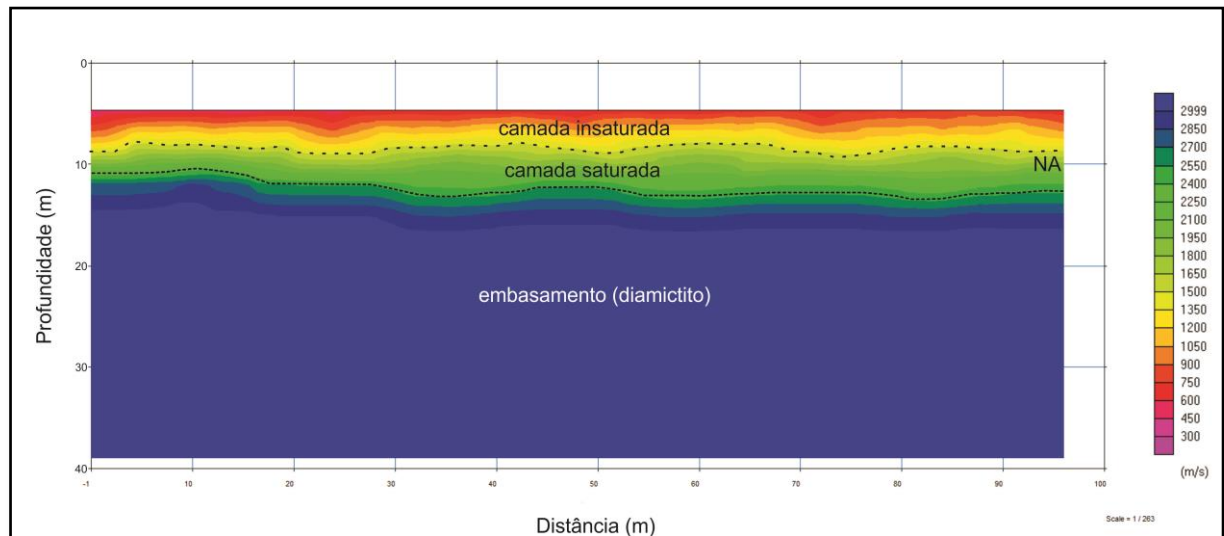
Para a construção do conjunto de gráficos de tempo x distância (Figura 57) e da seção sísmica (Figura 58) da barragem de Ipeúna, com a utilização do software *Seisimager*, foram considerados 28 tiros ao longo da linha (7 para cada base) espaçados de 4 metros entre si.

Figura 57 – Conjunto de gráficos de tempo x distância para a barragem de Ipeúna/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 58 - Seção sísmica da barragem de Ipeúna/SP a partir do *software SeisImager*.

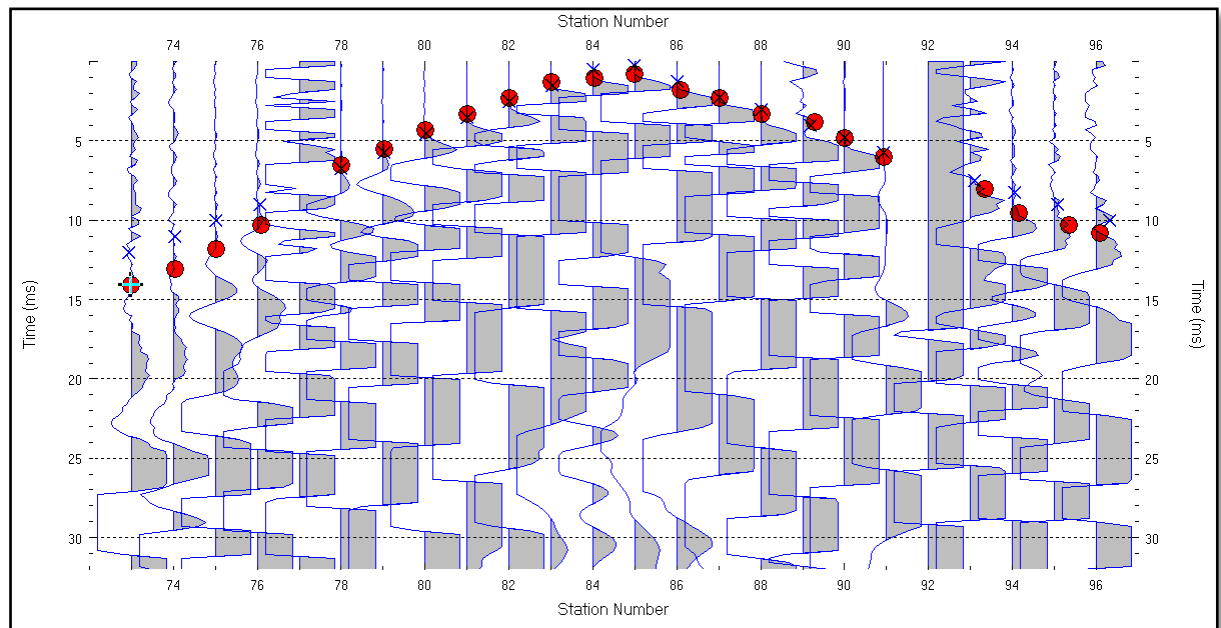


Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Em relação à seção sísmica obtida através do mesmo *software* na primeira etapa de campo, a seção representada pela Figura 58 apresentou aspecto mais homogêneo, sendo possível a identificação do zoneamento das camadas, como a profundidade do topo do embasamento, além do nível d'água.

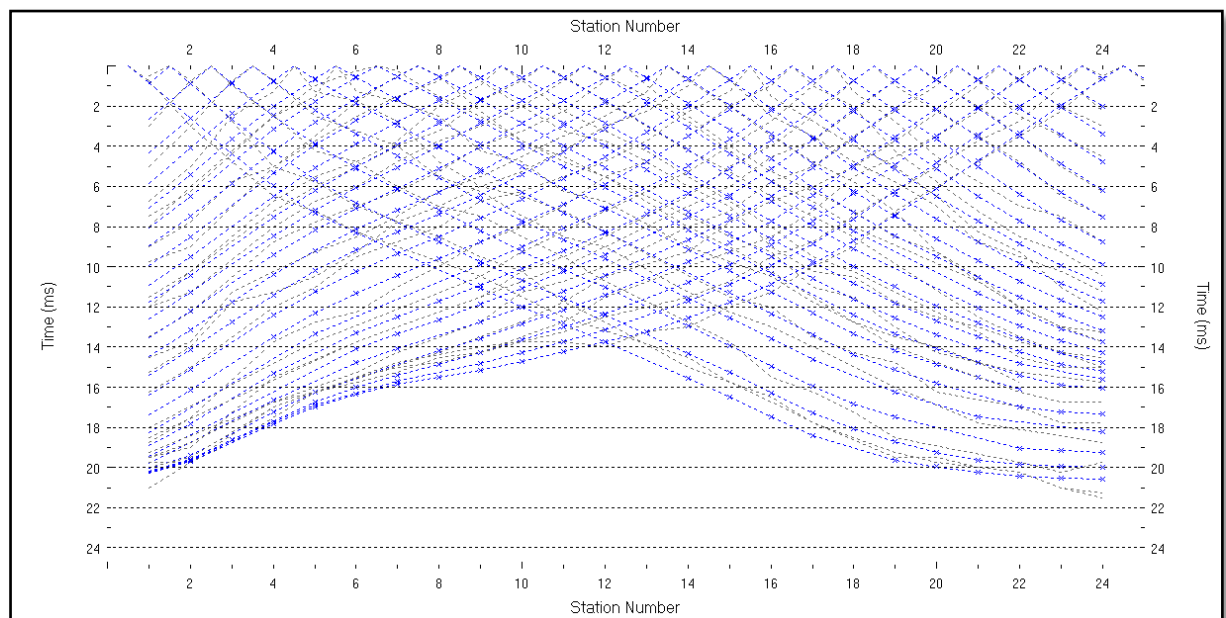
Já para análise dos dados de refração sísmica com o auxílio do *software Rayfract*, todos os tiros realizados ao longo da linha sísmica foram considerados. Assim, obteve-se um sismograma típico para a área (Figura 59); o conjunto de gráficos de tempo x distância, sendo possível a determinação da velocidade das camadas (Figura 60); a representação das áreas de cobertura dos raios sísmicos em relação a profundidade (Figura 61); e a seção sísmica tomográfica representante da área (Figura 62). O número de interações utilizado para obtenção das seções tomográficas também foi 10 para esta etapa.

Figura 59 - Sismograma típico obtido para a barragem de Ipeúna/SP, com representação das primeiras chegadas de ondas (pontos vermelhos).



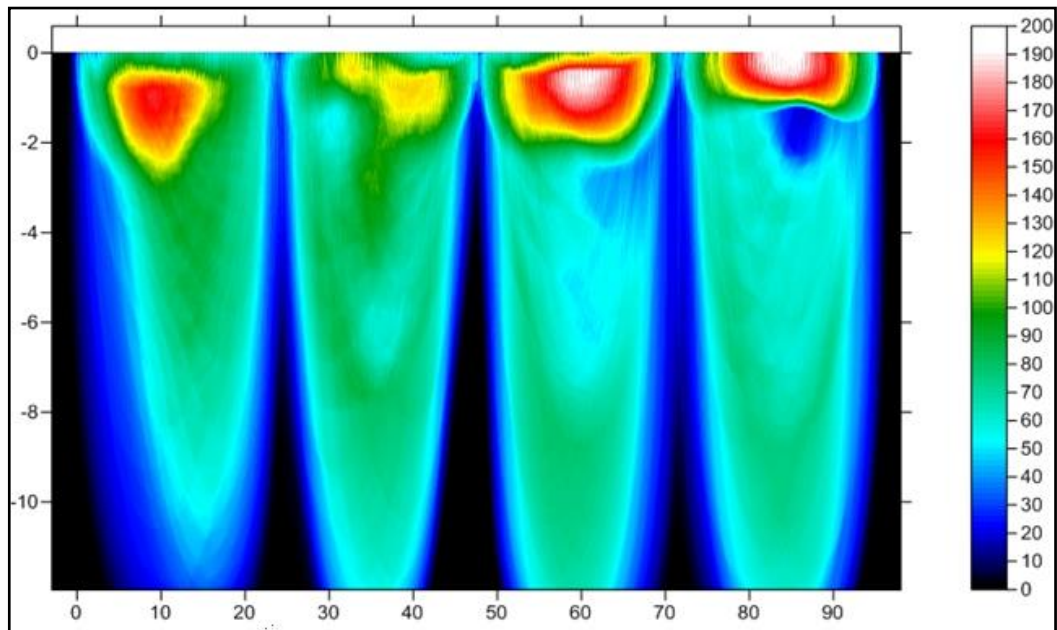
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 60 – Conjunto de gráficos tempo x distância representativo da barragem de Ipeúna/SP.



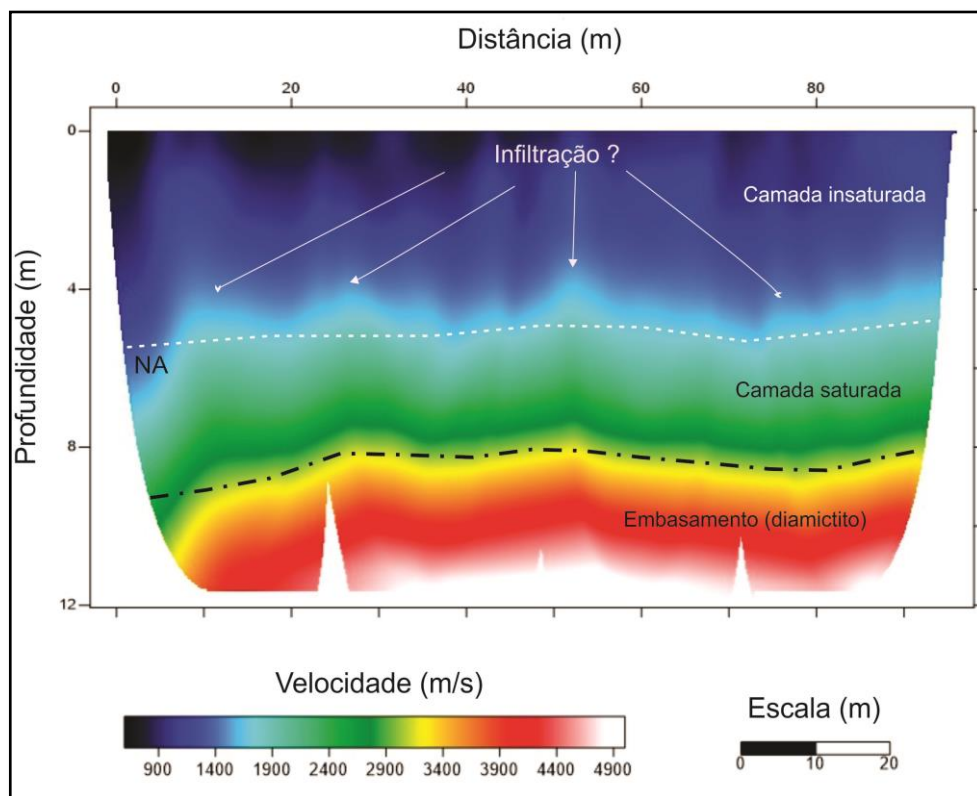
Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 61 - Área de cobertura dos raios sísmicos na barragem de Ipeúna/SP.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Figura 62 - Seção tomográfica representante da barragem de Ipeúna/SP a partir do *software Rayfract*.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Em comparação com os resultados da primeira etapa de campo, a seção sísmica da segunda etapa apresentou maior detalhamento das diferentes velocidades de ondas sísmicas ocorrentes ao longo do corpo da barragem. Com isso, além de possibilitar uma melhor identificação do zoneamento geológico-geotécnico da área, observou-se uma maior presença de zonas de velocidades correlacionáveis à presença de água no meio insaturado, podendo ser considerada a presença de infiltrações ao longo do corpo da barragem.

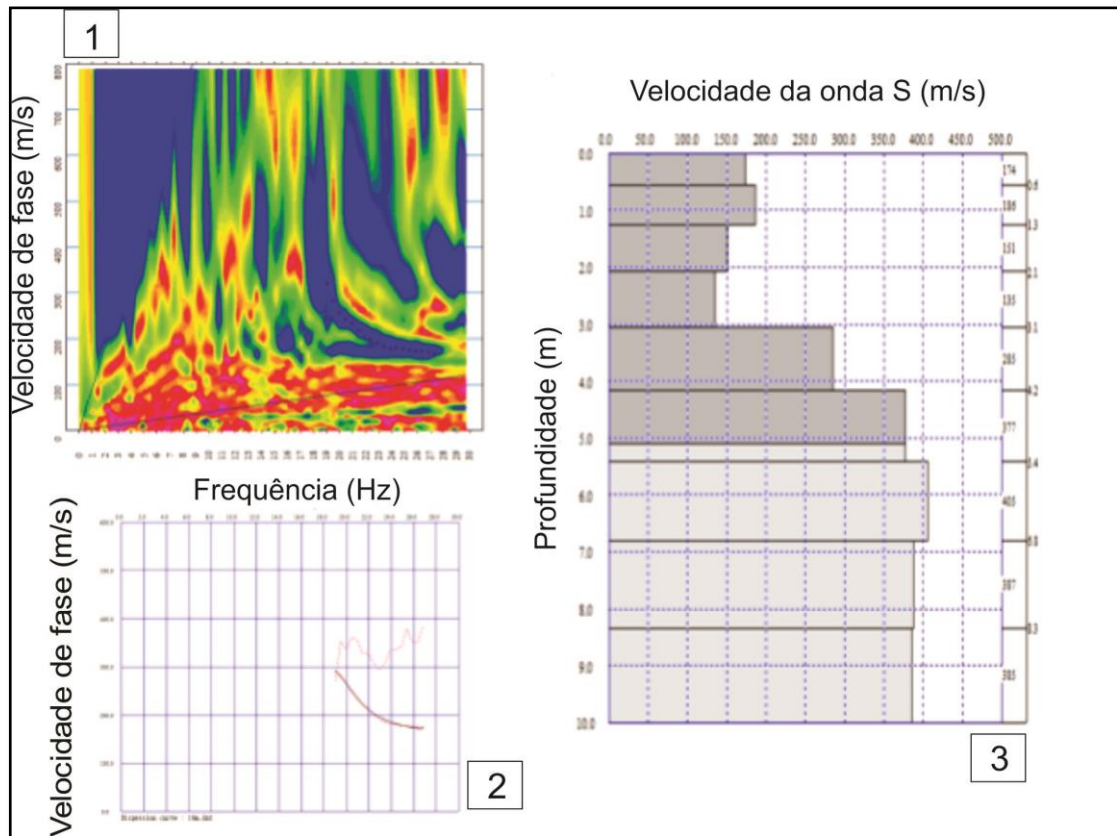
7.2 Análise multicanal de ondas de superfície (MASW)

A análise multicanal de ondas de superfície apresentou resultados que ficaram aquém das expectativas e nada satisfatórios nesse estudo, mesmo após constantes repetições. A seguir são apresentados os resultados encontrados para cada uma das barragens com uma discussão acerca das limitações aos ensaios, impostas pelas áreas.

7.2.1 Barragem de Cordeirópolis/SP

No caso da barragem de Cordeirópolis, a área não ofereceu uma boa resposta, fato agravado provavelmente pela existência de um vertedouro, cujo volume vazio, próximo à superfície, estaria gerando distorções na propagação das ondas superficiais, dificultando a análise de dispersão. Mesmo com esse problema foi possível obter o gráfico de velocidade de fase x frequência, a curva de dispersão e o modelo de distribuição da onda S em relação à profundidade característicos da área (Figura 63). Esses dados foram obtidos pelo processamento com o *software SeisImager*, a partir de um registro com *offset* de 16 metros (espaçamento entre geofones de 2 metros), com o qual foi possível analisar dados apenas até 5 metros de profundidade, como observado no gráfico 3 da figura 63.

Figura 63 – Resultados de MASW para a barragem de Cordeirópolis. (1) Gráfico velocidade de fase x frequência; (2) curva de dispersão; (3) modelo de distribuição da onda S em relação à profundidade.

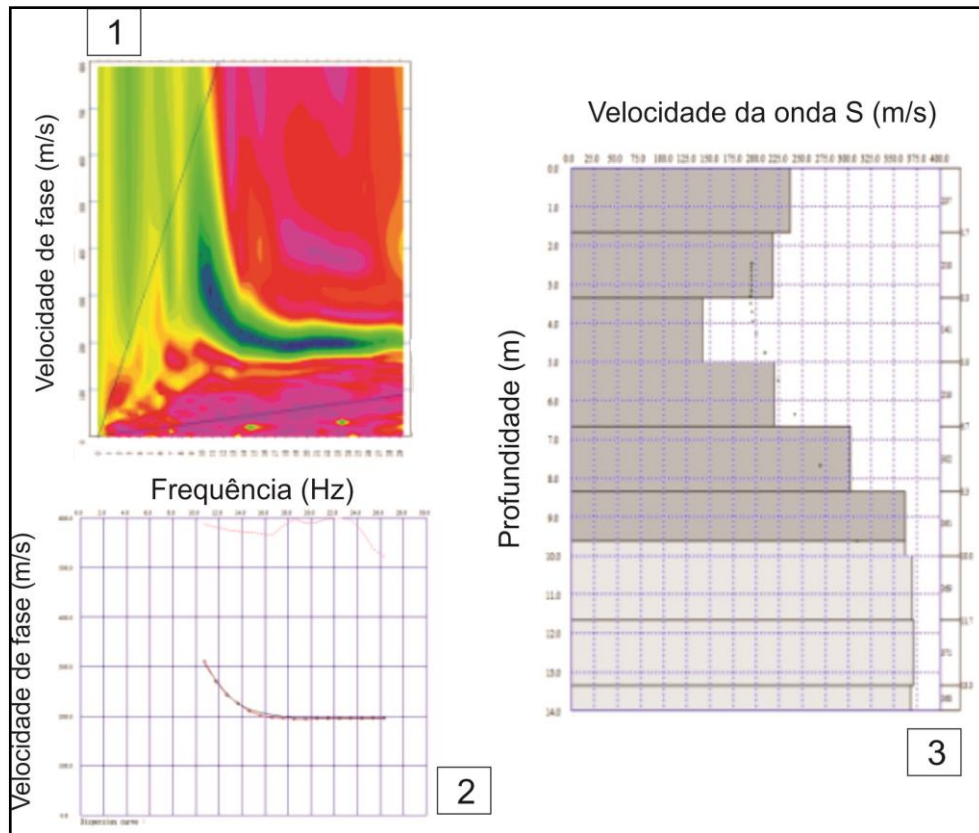


Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

7.2.2 Barragem de Ipeúna

Os resultados de MASW para a barragem de Ipeúna também não apresentaram boa qualidade e não permitiram uma análise confiável. A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir do tiro com *offset* de 3 metros (espaçamento entre geofones de 1,5 metros) o qual se apresentou melhor que os demais. Assim, é possível observar o gráfico de velocidade de fase x frequência, a curva de dispersão e o modelo de distribuição da onda S em relação à profundidade (Figura 64). A utilização de geofones com frequências menores, neste caso, possibilitou a análise de maiores profundidades.

Figura 64 - Resultados de MASW para a barragem de Ipeúna. (1) Gráfico velocidade de fase x frequência; (2) curva de dispersão; (3) modelo de distribuição da onda S em relação à profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

8 INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES

8.1 Barragem de Cordeirópolis

A barragem de Cordeirópolis foi construída em local de afloramento da Formação Serra Geral, sendo composta por solo laterítico argiloso característico da alteração de rochas básicas. Como observado na Tabela 2, em rochas básicas, como o diabásio presente na região, as ondas P se propagam com velocidades maiores que 5000 m/s. Entretanto, esse valor é calculado para rochas que não sofreram intemperismo e não possuem fraturas.

No caso da área de estudo, o diabásio apresenta-se altamente alterado e com diversas fraturas. Assim, foi utilizado um valor menor de velocidade de propagação das ondas P (aproximadamente 3000 m/s) para estimativas do topo rochoso, o qual pode ser encontrado a uma profundidade de aproximadamente 12 metros. Na Figura 46 o topo rochoso não foi interpretado, pois seu valor apresentou-se muito acima do normal, o que pode ter sido causado pelas diversas correções feitas no tempo de chegada das ondas P. Entretanto, as demais seções para esta área apresentaram uma boa correlação.

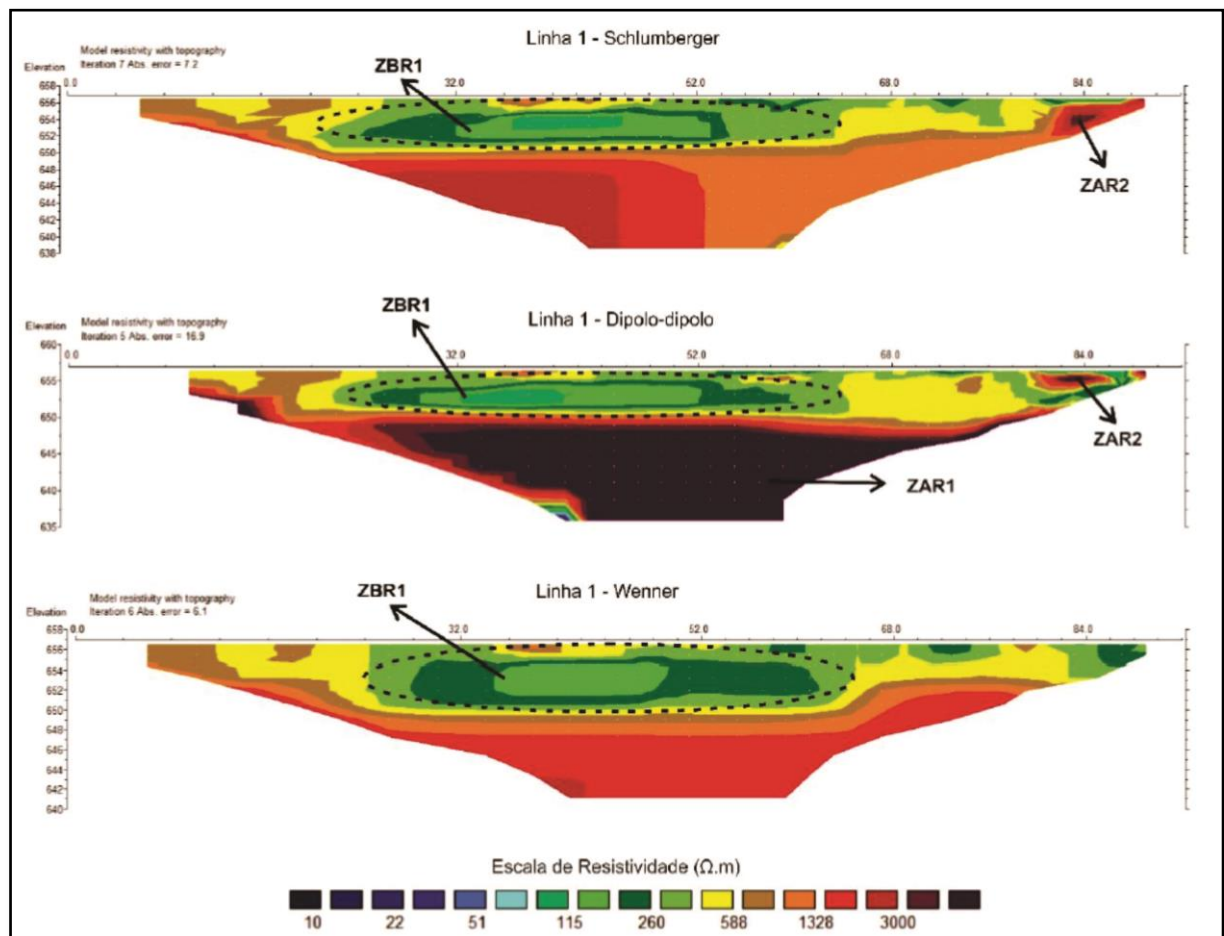
Em relação ao nível d'água local, este também foi interpretado a partir da velocidade de propagação das ondas P na água estabelecida pela Tabela 2 (1500 m/s). Assim, todas as seções apresentaram a profundidade do nível d'água em aproximadamente 7 metros, o que daria início à zona saturada da região.

Através das seções tomográficas construídas a partir do *software Rayfract* (Figuras 44 e 50), observou-se zonas de velocidades correlacionáveis à presença de água no meio insaturado, sugerindo a ocorrência de possíveis zonas de infiltração no corpo da barragem.

O projeto ao qual esta dissertação está vinculada (Processo Fapesp nº 2016/18080-9 intitulado “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geoelétricos e sísmicos”) possibilitou a realização de diversos ensaios geofísicos e geotécnicos que resultaram em diferentes trabalhos. Observando-se o trabalho de Coura (2019), nota-se que as mesmas linhas geofísicas utilizadas na primeira etapa de campo (Figura 34) foram utilizadas para levantamentos de Imageamento elétrico, com os métodos da Eletorresistividade e Polarização Induzida. Os dados de Eletorresistividade, através dos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner, apresentaram um melhor detalhamento da estrutura da barragem e foi possível a análise de diversas zonas com diferentes valores de resistividade, variando de 100 $\Omega.m$ a 3000 $\Omega.m$.

As seções geradas para a linha 1 na barragem (Figura 65) apresentaram duas zonas de alta resistividade (ZAR), chegando ao valor máximo da escala (3000 $\Omega.m$). A zona ZAR1, localizada na região central da barragem, pode ser determinada como o substrato rochoso da área, com início à 8 metros de profundidade, enquanto a segunda zona de alta resistividade (ZAR2) está localizada no setor direito da barragem, entre as distâncias de 80 e 90 metros.

Figura 65 - Seções de resistividade para a linha 1 na barragem de Cordeirópolis, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Coura (2019).

Zonas de baixa resistividade (ZBR) também puderam ser interpretadas nas seções, estando concentradas em regiões mais rasas, na parte central e a direita do barramento. As zonas com valores de resistividade até 115 $\Omega.m$ representam possíveis zonas de infiltração, sendo acima deste valor iniciada uma transição para uma zona menos saturada (Figura 65).

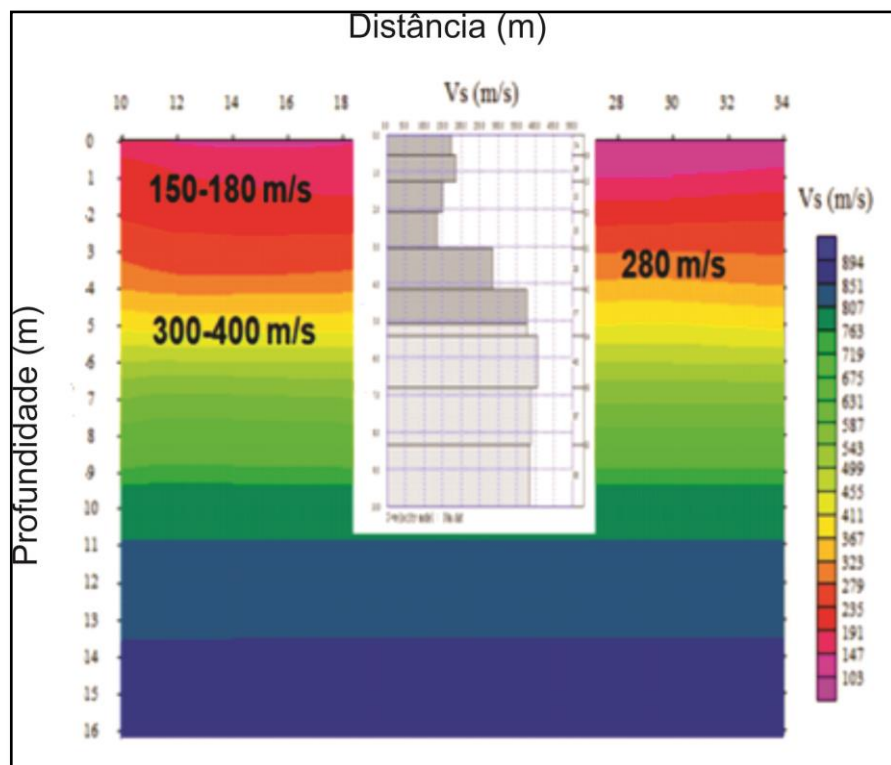
Desta forma, pode-se observar que as seções geradas através da sísmica de refração, principalmente a partir do *software Rayfract*, apresentam uma boa correlação com as seções

de eletrorresistividade, principalmente no que diz respeito à interpretação das possíveis zonas de infiltração. Nos dois casos essas zonas podem ser mais bem identificadas na parte central do barramento, com as zonas de baixa resistividade (Figura 65) e as zonas com velocidades correlacionáveis à presença de água (Figuras 44 e 50) chegando até aproximadamente 8 metros de profundidade, e evoluindo de maneira gradativa para zonas representadas por um índice de saturação mais baixo em menores profundidades.

Em relação aos dados de MASW, foi realizada uma tentativa de comparação entre o modelo de distribuição de ondas S com a seção sísmica obtida pela refração de ondas S, a qual foi realizada também dentro do projeto intitulado “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geolétricos e sísmicos” (Processo Fapesp nº 2016/18080-9) e é apresentada no relatório científico final.

Mesmo esses resultados tendo sido obtidos por diferentes ensaios, e estando com diferente resoluções, a comparação apresentou boa coerência (Figura 66).

Figura 66 - Comparação entre os modelos de MASW e sísmica de refração de ondas S para a área de Cordeirópolis.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

Assim, pode-se observar que próximo às regiões superficiais as velocidades variam entre 150 e 180 m/s, atingindo valores superiores a 350 m/s abaixo da profundidade de 4 metros. A inversão das velocidades observada entre as profundidades de 1 e 3 metros poderia ser consequência dos efeitos da existência de uma zona de menor compactação dentro da estrutura, ou ainda ocasionada pelo vertedouro existente no corpo da barragem, ou ainda pela presença de níveis lateríticos, comuns nesse tipo de solo constatados nas observações de campo.

8.2 Barragem de Ipeúna

A barragem de Ipeúna está localizada em uma área onde afloram rochas do Grupo Itararé. Como a variação litológica para esta formação é grande, valores de aproximadamente 2500 m/s de velocidade das ondas P foram adotados para interpretação do topo do embasamento (Tabela 2). Entretanto, como os resultados de sísmica de refração não apresentaram boa qualidade nesta barragem, os valores para a profundidade do topo do embasamento variaram de 10 a 15 metros nas seções, não sendo possível a sua interpretação exata.

Como na barragem de Cordeirópolis, o nível d'água local também foi interpretado a partir da velocidade de propagação das ondas P na água estabelecida pela Tabela 2 (1500 m/s). Neste caso também houve variação da profundidade encontradas em cada uma das seções construídas, com o nível d'água variando de 4 a 9 metros de profundidade.

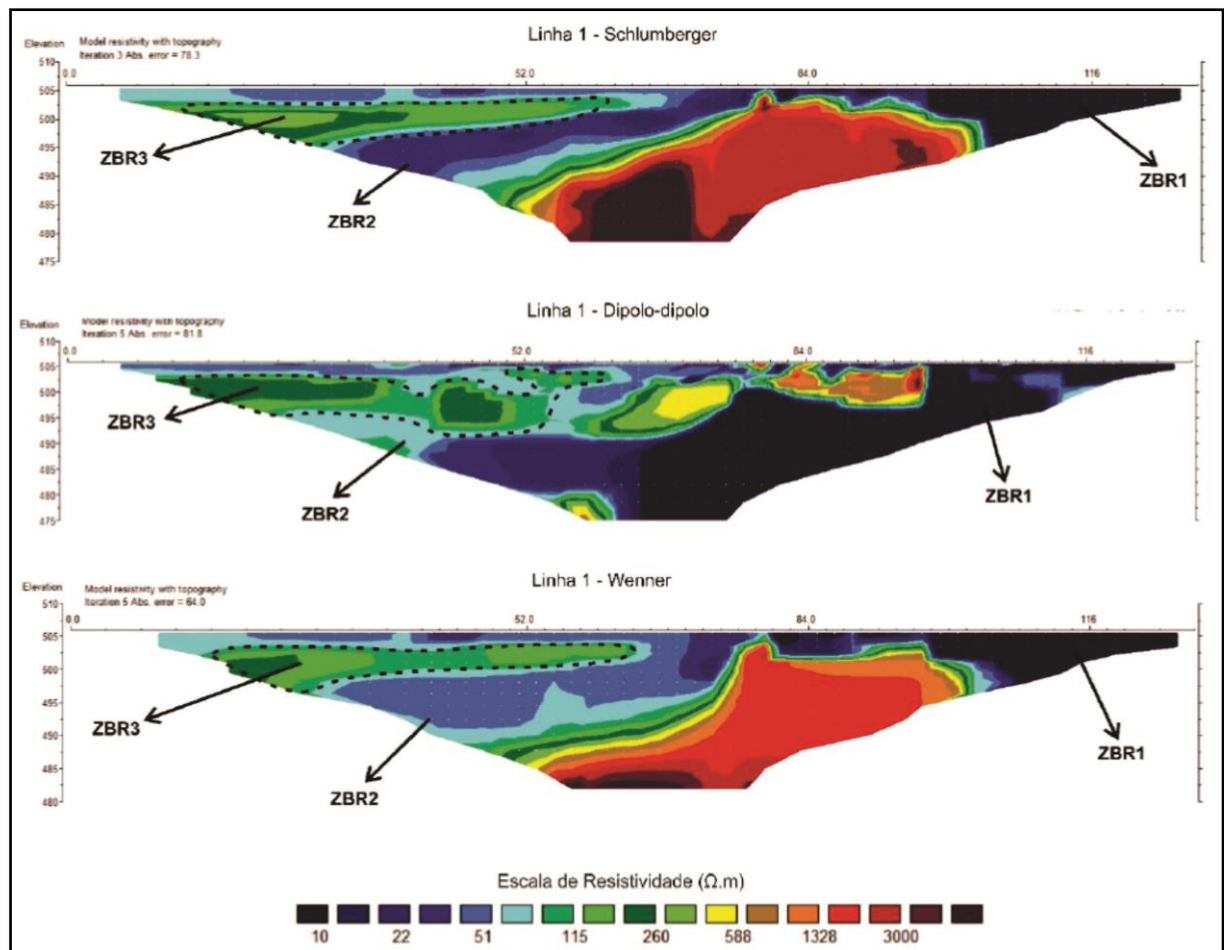
Através das seções tomográficas construídas a partir do *software Rayfract* (Figuras 56 e 62), observou-se zonas de velocidades correlacionáveis à presença de água no meio insaturado, sugerindo a ocorrência de possíveis zonas de infiltração no corpo da barragem. Além disso, observou-se uma melhora considerável nas seções sísmicas (tanto com o *software SeisImager*, quanto no *software Rayfract*) obtidas para a segunda etapa de campo, o que possibilitou uma melhor identificação do zoneamento geológico-geotécnico da área, e a melhor visualização das zonas possíveis zonas de infiltração.

Como o realizado para a barragem de Cordeirópolis, comparações com os modelos de eletrorresistividade gerados em Coura (2019) também foram possíveis.

Nas seções (Figura 67) é notável um predomínio de porções com valores baixos de resistividade (entre 10 $\Omega.m$ e 50 $\Omega.m$). A área com menor valor (10 $\Omega.m$) tem início na distância de 80 metros e caminha até o final da barragem (à direita da seção), atingindo profundidades de até 30 metros no arranjo Dipolo-dipolo, mas não ultrapassando 10 metros

nos arranjos Schlumberger e Wenner. Essa zona (ZBR1) pode ser caracterizada por solo argiloso e substrato saturado argiloso, o que ocasionaria em possíveis zonas de infiltração no corpo da barragem.

Figura 67 – Seções de resistividade para a linha 1 na barragem de Ipeúna, nos arranjos Schlumberger, Dipolo-dipolo e Wenner.



Fonte: Coura (2019).

Predominantemente, a área apresenta baixos valores de resistividade, o que reflete a geologia do local. A litologia da barragem apresenta uma variação faciológica, sendo que no início da linha são encontrados sedimentos mais areno-siltosos (valores de resistividade de 50 $\Omega.m$), com transição para uma predominância de silte na porção central (valores de resistividade entre 20 $\Omega.m$ e 40 $\Omega.m$), e da área central até o fim da barragem um material mais argiloso.

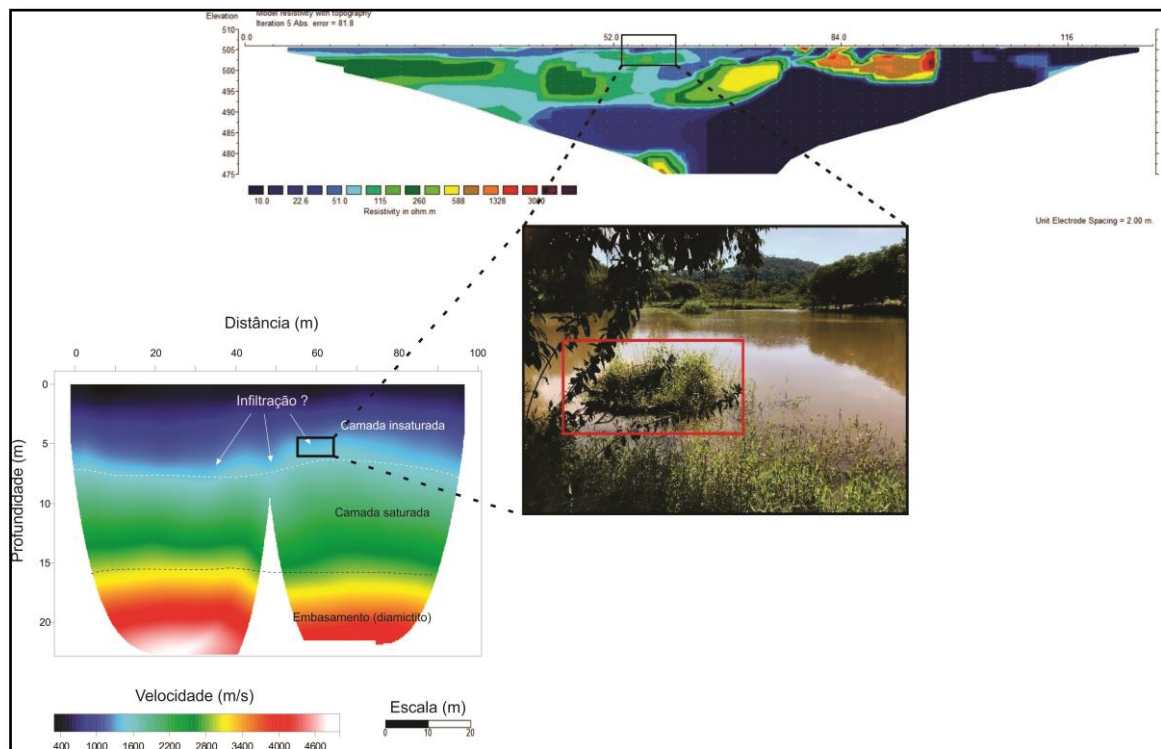
Em contraste com a predominância de baixos valores de resistividade nas seções, há uma zona mais resistiva (ZAR1) localizada entre as distâncias 78 e 98 metros, a qual atinge

profundidades de 10 metros no arranjo Dipolo-dipolo, e 30 metros nos arranjos Schlumberger e Wenner.

Em comparação com a seção sísmica obtida através do *software Rayfract* na primeira etapa de campo (Figura 56) os dados de eletrorresistividade corroboram para a explicação de variação do nível freático observado na área, o qual é ocasionado pela grande variação litológica encontrada ao longo do barramento. Nos dois casos, a zona saturada é relativamente rasa (início em 4 metros de profundidade), podendo chegar a até 10 metros em alguns locais.

Como já visto anteriormente, a barragem de Ipeúna está localizada entre dois reservatórios de água. Assim, durante a aquisição dos dados, a linha 1 ficou ao lado do reservatório 1, o qual apresentava-se, na época em que os trabalhos de campo foram realizados, com o nível d'água elevado, próximo à superfície (aproximadamente 1 metro). Além disso, a presença de um vertedouro de concreto, localizado aproximadamente na posição de 56 metros, junto com os valores de baixa resistividade e os valores de velocidades das ondas P característicos para zonas saturadas, podem ser interpretados como uma possível passagem de água que liga os dois reservatórios (Figura 68).

Figura 68 – Seção de resistividade (Linha 1, arranjo Dipolo-dipolo) e seção sísmica (Linha 1, etapa 1) representantes da barragem de Ipeúna, com a localização do vertedouro que liga os dois reservatórios.

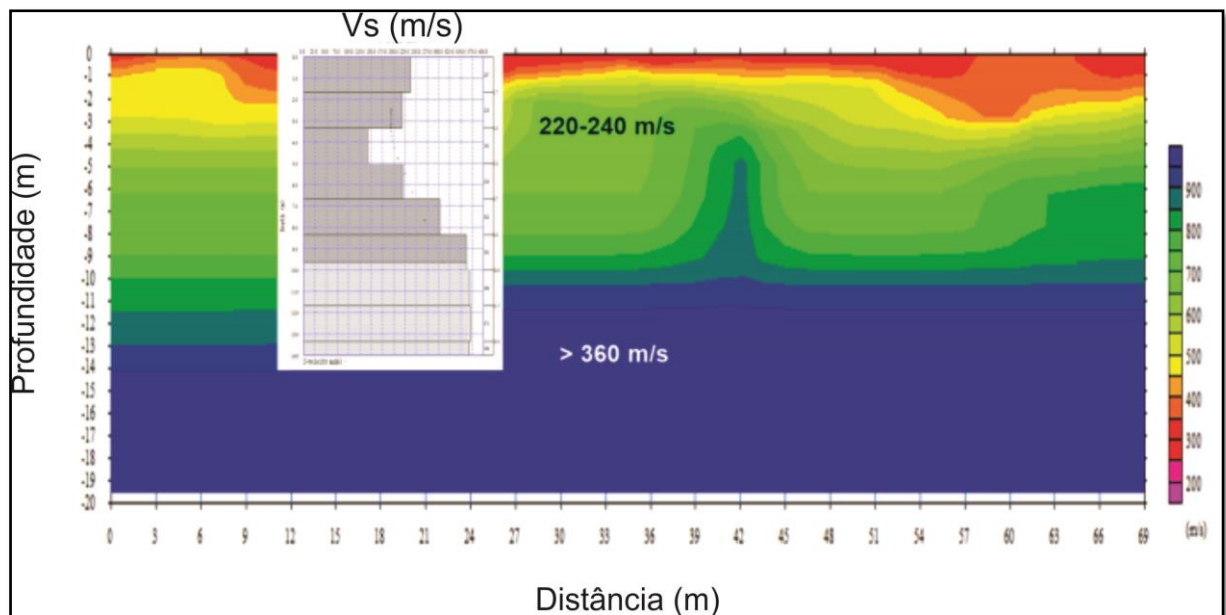


Fonte: Modificado de Coura (2019).

Assim como na barragem de Cordeirópolis, foi realizada a comparação entre os resultados de MASW e os da sísmica de refração com ondas S obtidos através do projeto “Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geoeletricos e sísmicos” (Processo Fapesp nº 2016/18080-9).

Entretanto, a boa coerência entre os resultados obtidos pelos dois métodos não se repetiu (Figura 69). As variações litológicas laterais mais severas existentes nesta área impõem maiores incertezas, levando à conclusão de que essa estratégia de interpretação necessita ser melhor estudada e entendida.

Figura 69 - Comparação entre os modelos de MASW e sísmica de refração de ondas S para a área de Ipeúna.



Fonte: Elaborado pela autora conforme dados da pesquisa.

9 CONCLUSÕES

Ao final do trabalho pôde-se concluir que os objetivos propostos foram cumpridos, mesmo com as dificuldades encontradas principalmente durante a interpretação dos dados. Em alguns casos não foi possível a leitura correta das primeiras chegadas das ondas sísmicas, provavelmente devido a variações litológicas locais e a presença de estruturas próximas, como vertedouros, sendo necessária uma leitura aproximada das mesmas. Mesmo assim, gráficos e seções representativos da área de cada barragem foram obtidos e possibilitaram discussões a cerca de suas estruturas.

A partir dos dados obtidos durante a primeira etapa de campo, com a geração das seções tomográficas representativas de cada área e posterior interpretação, observou-se que o tipo de arranjo escolhido não era o mais adequado. As seções não apresentaram bom detalhamento e efeitos de atenuação ou dispersão de energia causados pela presença dos vertedouros nas duas barragens podem ter influenciado em uma leitura errada de alguns dados.

Assim, uma segunda etapa de campo foi necessária, desta vez diminuindo-se o espaçamento entre os geofones para 1 metro, além de terem sido utilizados geofones de 10 Hz e evitando-se a disposição destes na porção da barragem sobre o vertedouro. Desta forma, observou-se uma melhora considerável, possibilitando maior detalhamento do corpo das barragens e, conseqüentemente, melhor interpretação de suas estruturas e zonas de infiltrações ocorrentes.

O método da sísmica de refração, com utilização da inversão tomográfica, se mostrou satisfatório para a identificação das diferentes zonas de velocidades de ondas P ao longo das barragens, possibilitando a determinação de características como o zoneamento geológico-geotécnico e da profundidade do nível d'água em cada área.

Em relação à ocorrência de fraturas e infiltrações nas estruturas, os resultados obtidos pelo *software Rayfract* e durante a segunda etapa de campo foram melhores, sendo possível a identificação de zonas saturadas dentro de zonas que normalmente encontrar-se-iam insaturadas, podendo ser consideradas a presença de infiltrações ao longo do corpo das barragens. Entretanto, na barragem de Ipeúna, os dados sísmicos de refração obtidos não apresentaram boa qualidade, possivelmente devido à grande variação litológica encontrada na região, o que não permitiu boa confiabilidade dos resultados obtidos.

Já os resultados de MASW, apresentaram-se insatisfatórios para o objetivo do estudo, não possibilitando interpretações para nenhuma das áreas de estudo, levando à conclusão de

que essa estratégia de interpretação necessita ser melhor estudada e entendida. Ainda em relação a esse método, é importante ressaltar que ele é, atualmente, um dos mais empregados para obtenção, a partir do modelo de distribuição da velocidade da onda S, o valor de “ V_{s30} ”, parâmetro fundamental e amplamente utilizado na avaliação do risco sísmico de estruturas naturais ou artificiais que possam ser submetidas às vibrações causadas por terremotos (DOURADO et al., 2017).

A comparação com o método geofísico de eletrorresistividade também realizado nas áreas das barragens, além da observação da composição litológica de suas estruturas, permitiu uma visão abrangente dos caminhos preferenciais de infiltração, estratificação do interior dos barramentos e variação da composição litológica, principalmente na barragem de Ipeúna, realçando a complexidade estrutural e composicional das barragens, mesmo elas sendo de pequeno porte e apresentando sistema construtivo simplificado.

Apesar dos dados geofísicos, principalmente os originados pela sísmica de refração, apresentarem dados confiáveis para determinação de possíveis zonas de infiltrações ao longo do corpo das barragens, é sempre recomendado o uso de métodos diretos para a confirmação da ocorrência de infiltração, como a construção de poços de monitoramento e uso de piezômetro. Além disso, é necessária a realização de ensaios e estudos durante todas as etapas de um projeto, desde a fase de construção até o fim da vida útil da barragem.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2016**. Brasília, 225 p, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2014**. Brasília, 225 p, 2015.
- BEDROSIAN, P. A., BURTON, B. L., POWERS, M. H., MINSLEY, B. J. **Geophysical investigations of geology and structure at the Mathis Creek Dam, Truckee, California**. Journal of Applied Geophysics, v. 77, p.7-20, 2012.
- BRASIL. Lei nº 12344 de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens (PNBS)**. Brasília, DF, 2010.
- CAMARERO, P.L. **Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos**. 2016. 97f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2016.
- CESTARI JUNIOR, E. **Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens: UHE Três irmãos estudo de caso**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2013.
- CHUGH, A. 2011. **Embankment Dams – Chapter 1: General Design Standards Phase 4 (Final)**. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, USA.
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- COURA, M. M. **Aplicação de métodos geoeletricos para análise da estabilidade de barragens de terra**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. 111p. Rio Claro. 2019.
- CULLEN, A. H. **Rios Prisoneiros: A História das Barragens**. Belo Horizonte. Ed. Editora Itatiaia Limitada de Belo Horizonte, 1964.

DOURADO, J. C. **Sísmica de Refração – Procedimento de campo e interpretação.** 2008. UNESP – Métodos Sísmicos e Radar de penetração no solo aplicados aos levantamentos geológicos. Rio Claro. 2018.

DOURADO, J.C. **Ondas Sísmicas.** 2012. UNESP – Métodos Sísmicos e Radar de penetração no solo aplicados aos levantamentos geológicos. Rio Claro. 2018.

DOURADO, J.C.; BELUCO, R.O.; MORAIS, D.S.; MALAGUTTI FILHO, W.; MOREIRA, C.A. – 2017 – O uso do Parâmetro Vs30 no Perigo Sísmico. Anais do 27º Simpósio de Geologia do Nordeste – João Pessoa – PB.

EIKMEIER, C.N. **Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação.** 2018. 132f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2018.

EUROPEAN ASSOCIATION OF GEOSCIENTISTS & ENGINEERS (EAGE) – 2014 – **Application manual of geophysical methods to engineering and environmental problems.** Society of Exploration Geophysicists of Japan. 661 p.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. 2005. **Geotechnical engineering of dams.** A.A. Balkema Publishers. London, UK, 907p.

FOTI, S. et al. **Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project.** Bull Earthquake Eng, p. 1-54, 2017.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. **Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1).** Boletim de Geociências da PETROBRÁS, v. 2, n. 2/4, p. 147-191, 1988.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados Climáticos.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home2/index>. Acesso em 10 de julho de 2019.

LECOMTE, I., GJØSTDAL, H.; DAHLE, A.; PEDERSEN, O. C. 2000. **Improving modelling and inversion in refraction seismics with first-order Eikonal solver.** Geophysical Prospecting, v 48, p. 437–454.

MACEDO, F. Risco de rompimento da barragem de Brumadinho era 20 vezes maior que o aceitável, afirmam peritos. **Estadão**, 27 de janeiro de 2020. Disponível em: <<https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/risco-de-rompimento-da-barragem-de-brumadinho-era-20-vezes-maior-que-o-aceitavel-afirmam-peritos/>>. Acesso em: 11 de fev. 2020.

MACHADO, F. B. **Petrologia e caracterização geoquímica das fontes mantélicas da região nordeste da província magmática do Paraná**. 2009. 209 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2009.

MALAGUTTI FILHO, W. **Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na geologia de planejamento urbano**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp – Rio Claro, 1991.

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

MALAGUTTI FILHO, W. et al. Estudos da estabilidade de barragens de terra através da integração de métodos geofísicos, geoeletricos e sísmicos. Relatório científico final apresentado à FAPESP, 2019.

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

MASW DATA ACQUISITION. 2018. Disponível em:<<http://masw.com/DataAcquisition.html>>. Acesso em: 13 de jan. 2019.

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

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

MOONEY, W.D.1984. **An interpretation of synthetic seismograms for a two-dimensional structure, workshop proceedings: Interpretation of seismic wave**

propagation in laterally heterogeneous structures, Australian Bureau and Mineral Resources. Geology and Geophysics Report 258, pp. 159-165.

NARITA, K. 2000. **Design and construction of Embankment Dams.** Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology. Disponível em: <http://aitech.ac.jp/~narita/tembankmentdam1.pdf>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

OSAZUWA, I.B.; CHINEDU, A.D. 2008. **Seismic refraction tomography imaging of high permeability zones beneath an Earth dam, in Zaria área, Nigeria.** Jornal of applied Geophysics. 66, p. 44-58.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. **Multichannel Analysis of Surface Waves using Vibroseis (MASWV).** SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996, p. 68-71, 1996.

PARK, C.; MILLER, R.; LAFLEN, D.; NEB, C.; IVANOV, J.; BENNETT, B.; HUGGINS, R. **Imaging dispersion curves of passive surface waves.** SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 1357-1360, 2004.

PARK, C.B., MILLER, R.D. AND XIA, J. – 1999- **Multichannel analysis of surface waves.** Geophysics, 64(3): 800-803.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra.** 2009. 149f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de engenharia civil e ambiental da faculdade de tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PERINOTTO, J. A. J., ZAINE, J. E. **Coluna Estratigráfica da Região de Rio Claro.** 2008.

PETRI, S., SOUZA, P. A. **Síntese dos conhecimentos e novas concepções sobre a bioestretigrafia do Subgrupo Itararé, Bacia do Paraná, Brasil.** Revista do Instituto Geológico, v. 14, n. 2, p. 7 – 18, 1993.

RAYFRACT MANUAL. Disponível em: < <http://rayfract.com/help/rayfract.pdf> >. Acesso em: 12 de junho de 2019.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado.** São Paulo: Instituto Florestal. V.1. 118p, 2017.

SCHNEIDER, R.L., MÜHLMANN, H., TOMMASI, E., MEDEIROS, R. A., DAEMON, R. F., NOGUEIRA, A. A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais..., Porto Alegre: SBG, v. 1, p. 41 – 65. 1974.

SCHUSTER, G.T., QUINTUS-BOSZ, A. – 1993- **Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory**. GEOPHYSICS, 58(9), 1314-1323.

SEISIMAGER 2D MANUAL. Versão 3.3 de outubro de 2009. Disponível em:<http://epsc.wustl.edu/~epsc454/manuals/SeisImager2D_Manual_v3.3.pdf>. Acesso em: 05 de julho de 2019.

SEISIMAGER/SW MANUAL. Versão 3.0 de outubro de 2009. Disponível em:<<https://vdocuments.site/seisimagersw-manual-v30.html>>. Acesso em : 05 de julho de 2019.

SHEEHAM, J. R.; DOLL, W. E. & MANDELL, W. A. 2005 - **An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis**. In : JEEG, March 2005, Volume 10, Issue 1, p. 21–34.

SILVA, G.M.P.- 1999- **Diagnóstico Ambiental, Qualidade de Água e Índice de Depuração do Rio Corumbataí – SP**. . Dissertação (Mestrado) – Centro de Estudos Ambientais – CEA, Universidade Estadual Paulista, 155p.

SIQUEIRA, L. F. S. **Tectônica deformadora em sinéclises intracratônicas: a origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP**. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SJOGREEN, B. Shallow Refraction Seismic , Chapman and Hall. 220 p. London, 1984.

SOUSA, M. O. L. **Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau d’Alho e Jibóia – centro do Estado de São Paulo**. 2002. 227 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

TEIXEIRA, W. L. **Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai – Espanha**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

ZAINE, J. E. **Geologia da formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)**. 1994. 90 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1994.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; VIEIRA, I. S.; ASTOLFI, M. A. M.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. **A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 242-252, 1987.