

JULIANA ARRAES DE ARAGÃO VILLAR

**ANÁLISE DE DADOS GEOFÍSICOS NO CONTEXTO DE MONITORAMENTO DE
BARRAGEM - ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BR DE CATALÃO, GO**

Trabalho Final de Curso
(Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro – RJ
Agosto de 2024



JULIANA ARRAES DE ARAGÃO VILLAR

**ANÁLISE DE DADOS GEOFÍSICOS NO CONTEXTO DE MONITORAMENTO DE
BARRAGEM - ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BR DE CATALÃO, GO**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia
do Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do Grau de Bacharel em
Geologia.

Orientadores:

Prof. Dr. Marco Antonio da Silva Braga

MSc. Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha

UFRJ

Rio de Janeiro – RJ

Agosto de 2024

Juliana Arraes de Aragão Villar

Análise de dados geofísicos no contexto de monitoramento de barragem - estudo de caso da barragem BR de Catalão, GO/

Juliana Arraes de Aragão Villar – Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO, 2024.

xi, 75 p.: il., 30cm

Trabalho de Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2024.

Orientadores: Marco Antonio da Silva Braga,

1. Geologia. 2. IGEO – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Marco Antonio da Silva Braga. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Correlação de dados geofísicos no contexto de monitoramento de barragem - Estudo de caso da barragem BR de Catalão, GO

JULIANA ARRAES DE ARAGÃO VILLAR

ANÁLISE DE DADOS GEOFÍSICOS NO CONTEXTO DE MONITORAMENTO DE
BARRAGEM - ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM BR DE CATALÃO, GO

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia
do Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do Grau de Bacharel em
Geologia.

Orientadores:

Prof. Dr. Marco Antonio da Silva Braga

MSc. Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha

Aprovado em: 27/08/2024

Por:

Orientador: Prof. Marco Antonio da Silva Braga, D. Sc (UFRJ)

Coorientador: MSc. Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha (UFRJ)

Prof. João Paulo Porto Barros, D. Sc (UFRJ)

Viktor Souto Louback Silveira, D Sc (UFRJ)

UFRJ

Rio de Janeiro – RJ

Julho 2024

Agradecimentos

Agradeço à Mosaic Fertilizantes e Fundação Coppetec pelo apoio financeiro fornecido ao Projeto de Monitoramento de Barragens, possibilitando assim o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro por todo o suporte inestimável durante a minha jornada acadêmica. Mesmo diante de desafios financeiros, a instituição sempre demonstrou um compromisso notável com o suporte estudantil e científico gratuito. Esta experiência não apenas enriqueceu o meu conhecimento, mas também me permitiu crescer como profissional.

Ao meu orientador Prof. Marco Braga, levo comigo não apenas conhecimento, mas também memórias valiosas e lições que serão a base do meu futuro.

Agradeço ao CPGA de coração por ter tido a oportunidade de fazer parte desta comunidade que valoriza o desenvolvimento integral dos seus estudantes. A orientação e a infraestrutura proporcionadas foram fundamentais para que eu pudesse realizar esta pesquisa e alcançar um marco significativo em minha jornada educacional.

À toda a minha família, principalmente meus pais, cujo apoio incansável e amor incondicional foram os pilares fundamentais que me impulsionaram a concluir esta jornada acadêmica.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo da vida e aos que eu tive o prazer de adquirir ao longo da graduação por estarem ao meu lado e por me aturarem de maneira tão paciente. Suas risadas, apoio e companhia tornaram esta jornada muito mais leve e memorável. Sou verdadeiramente grata por ter amigos tão especiais que compartilham cada momento desta jornada comigo.

Aos meus colegas de jornada do Centro de Geofísica Aplicada (CPGA), pela amizade que construí ao longo desses anos, a troca de conhecimentos, e por me ajudarem a crescer pessoalmente. Principalmente a Amanda Mendes e a Anne Karine que chegaram para serem grandes parceiras nos nossos projetos, a sua dedicação e colaboração foram essenciais para alcançarmos nossos objetivos.

DISCLAIMER

|Eu, Juliana Arraes de Aragão Villar, declaro que este trabalho de conclusão de curso intitulado “Correlação de dados geofísicos no contexto de monitoramento de barragem – Estudo de caso da Barragem BR de Catão, GO” possui inteiramente e exclusivamente cataras acadêmico. Logo, todos os resultados obtidos e conclusões deste não apresentam nenhum vínculo com a avaliação da estabilidade ou segurança global da estrutura, alvo da pesquisa científica.

Rio de Janeiro, 27/08/2024

Pushed from the precipice
Climbed right back up the cliff
Long story short, I survived
Taylor Swift

Resumo

Villar, Juliana Arraes de Aragão. **Análise de dados geofísicos no contexto de monitoramento de barragem - Estudo de Caso da Barragem BR de Catalão, GO.** Rio de Janeiro, 2024. 75 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Barragens de rejeito são estruturas complexas projetadas para armazenar resíduos resultantes da produção mineral, descartados durante os processos de lavra e beneficiamento. O monitoramento dessas estruturas tradicionalmente envolve inspeções visuais e instrumentação geotécnica. No entanto, recentes incidentes em barragens no Brasil evidenciaram a urgência em buscar métodos mais eficazes de monitoramento para prevenir futuros acidentes, mostrando a necessidade de desenvolver novas técnicas que proporcionem uma caracterização mais abrangente das condições do maciço. Nesse contexto, os métodos geofísicos oferecem imagens contínuas da subsuperfície, possibilitando não só a caracterização da estrutura, mas permitindo o diagnóstico, junto a análises geotécnicas, de eventuais irregularidades em seus componentes construtivos. Nesse trabalho foram utilizados três métodos geofísicos: a Eletroresistividade, a sísmica por meio do *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) e a microssísmica pela abordagem da Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente. A eletroresistividade, baseada na injeção de corrente no solo, permite a determinação da resistividade dos materiais em subsuperfície; o método MASW utiliza dados sísmicos para calcular a velocidade da onda S (V_s) em profundidade, permitindo a análise das propriedades de dispersão das ondas cisalhantes; e a microssísmica possibilita o monitoramento em tempo real das propriedades físicas da barragem, detectando variações nas velocidades das ondas sísmicas, podendo indicar mudanças no estado do maciço. A Barragem de Rejeitos BR está localizada no município de Catalão, na área de lavra do Complexo Mineralógico, com a função de conter os rejeitos gerados pelo beneficiamento da rocha fosfática. Este estudo visou caracterizar os perfis de velocidade da onda S em profundidade, correlacionando-os com regiões anômalas de baixa resistividade detectadas e estabelecendo pontos de atenção na estrutura que indicam materiais com maior umidade. Adicionalmente, foi analisada a variação da velocidade da onda S durante o monitoramento em tempo real, proporcionando uma compreensão mais detalhada das condições dinâmicas do maciço ao longo do tempo. A análise foi complementada pelo desenvolvimento de um modelo tridimensional para mapear as anomalias presentes no maciço. Diversas seções mostraram anomalias de baixa resistividade localizadas próximas à região de inflexão do maciço em direção à ombreira esquerda. Além disso, os resultados do MASW indicaram a presença de zonas de baixa velocidade ao longo do maciço. Observando que as regiões com velocidades mais baixas geralmente coincidem com áreas de menor resistividade. Portanto, a integração dos métodos de Eletroresistividade, MASW e microssísmica permitiu a identificação tanto da extensão quanto da profundidade das áreas anômalas, sendo possível observar a continuidade e a interconexão das zonas de baixa resistividade e de baixa velocidade, ajudando a determinar as áreas anômalas do maciço.

Palavras-chave: Geofísica, Barragem de Rejeito, Eletroresistividade, MASW.

Abstract

Villar, Juliana Arraes de Aragão. **Análise de dados geofísicos no contexto de monitoramento de barragem - Estudo de Caso da Barragem BR de Catalão, GO.** Rio de Janeiro, 2024. 72 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Tailings dams are complex structures designed to store waste resulting from mineral production, discarded during mining and processing operations. The monitoring of these structures traditionally involves visual inspections and geotechnical instrumentation. However, recent incidents in Brazilian dams have highlighted the urgency of seeking more effective monitoring methods to prevent future accidents, underscoring the need to develop new techniques that provide a more comprehensive characterization of the embankment conditions. In this context, geophysical methods offer continuous subsurface imaging, enabling not only the characterization of the structure but also the diagnosis of potential irregularities in its construction components when combined with geotechnical analyses. In this study, three geophysical methods were employed: Electrical Resistivity, seismic through Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), and microseismic via Ambient Noise Seismic Interferometry. Electrical Resistivity, based on injecting current into the ground, allows the determination of the resistivity of subsurface materials; the MASW method uses seismic data to calculate the S-wave velocity (V_s) at depth, allowing the analysis of shear wave (V_s) dispersion properties; and microseismic monitoring enables real-time observation of the physical properties of the dam, detecting variations in seismic wave velocities, which may indicate changes in the embankment's state. The BR Tailings Dam is located in the municipality of Catalão, within the mining area of the Mineroquímico Complex, with the purpose of containing the tailings generated by the processing of phosphate rock. This study aimed to characterize the profiles of S-wave velocity variation at depth, correlating them with anomalous low-resistivity regions detected by the geo-electrical campaign, establishing critical points in the structure that indicate areas with higher moisture content. Additionally, the variation in S-wave velocity during real-time monitoring was analyzed, providing a more detailed understanding of the embankment's dynamic conditions over time. The analysis was complemented by the development of a three-dimensional model using Leapfrog Geo software to map the anomalies present in the embankment. Several sections revealed low-resistivity anomalies located near the inflection region of the embankment towards the left abutment. Furthermore, MASW results indicated the presence of low-velocity zones throughout the embankment, noting that regions with lower velocities generally coincide with areas of lower resistivity. Therefore, the integration of Electrical Resistivity, MASW, and microseismic methods allowed the identification of both the extent and depth of anomalous areas, making it possible to observe the continuity and interconnection of low-resistivity and low-velocity zones, helping to determine the anomalous areas of the embankment.

Key-words: Geophysics, Tailings Dam, Geotechnics

Lista de Figuras

Figura 1: Imagem de satélite (Google Earth, 2023) mostrando a localização da barragem pertencente ao Complexo Mineraloquímico de Catalão.	20
Figura 2: Província Tocantins (Fonte: CPRM, 2008).....	21
Figura 3: Mapa Geológico Regional do sudeste do estado de Goiás, com a área de estudo demarcada. (Fonte: NEOGEO).....	22
Figura 4: Mapa geológico do complexo alcalino ultramáfico-carbonatítico de Catalão I mostrando a distribuição das áreas mineralizadas (Ribeiro, 2008).	23
Figura 5: Principais estruturas de drenagem externa da Barragem BR do Complexo Mineraloquímico de Catalão (NEOGEO, 2018).	25
Figura 6: Esquema de aquisição da resistividade por meio de um arranjo de quatro eletrodos, com os eletrodos de potencial M e N posicionados entre os eletrodos de corrente A e B. (Fonte: Modificado de KNÖDEL et al, 2007)	27
Figura 7: Fluxo de Corrente em um corpo cilíndrico (Fonte: Knödel et al. 2008.)	28
Figura 8: Desenho esquemático do arranjo dipolo-dipolo (Fonte: Braga, 2006).	30
Figura 9: Disposição das 23 seções de caminhamento elétrico (CE) ao longo da Barragem BR de Catalão.	31
Figura 10: Sismograma obtido de uma detonação que gerou um pico de "ground motion" de aproximadamente 0,9 mm/s (DIAS et al., 2016).	32
Figura 11: Principais modos de propagação das ondas sísmicas As ondas P (a) e S (b) são ondas de corpo, enquanto que as Rayleigh (c) Love (d) e são ondas superficiais. (Teixeira et al. 2008).	33
Figura 12: Representação de um sismograma típico indicando as chegadas dos diferentes tipos de ondas (modificado de Kusky 2008).	34
Figura 13: Localização de um evento sísmico a partir de três sensores (modificado de Xiao et al. 2016).	34

Figura 14: Os sismógrafos registram todas as vibrações disponíveis, não apenas os terremotos e detonações. Essas diversas fontes induzem ondas sísmicas com diferentes modos de vibração (harmônicos, difusos e transientes), que são detectáveis a grandes distâncias (DENOLLE; NISSEN-MEYER, 2020)	37
Figura 15: Representação da propagação de onda pela abordagem da interferometria sísmica. (a) Uma onda plana viajando ao longo do plano x emitida por uma fonte impulsiva em $x = x_0$ e $t = t_0$; (b) Resposta na observada no geofone 1, em $t = t_1$; (c) Resposta observada no geofone 2, em $t = t_2$; e (d) Correlação cruzada das respostas no geofone 1 e 2. (Modificado de Wapenaar et al. 2009).	38
Figura 16: Sismograma mostrando os tempos de origem e chegada das ondas P e S e a região tardia chamada de coda wave (KIM et al., 2017).	39
Figura 17: Arquitetura de instalação de sensores em barragens (Fonte: Institute of Mine Seismology).	41
Figura 18: Etapas para construção de uma pseudo-seção 2D de V_s com o método MASW. A) alinhamento horizontal de modelos 1D; B) interpolação de dados.	43
Figura 19: Mapa de localização da área de pesquisa exibindo a distribuição dos quatro perfis de aquisição do método MASW. Os números atribuídos às linhas indicam o ponto de partida de cada perfil de aquisição de dados (Fonte: Google Earth).	45
Figura 20: Fotos de procedimentos de aquisição de dados sísmicos. A) linha de geofones posicionados a cada 5 m; B) posição de tiro com off-set mínimo de 5m (distância entre fonte e primeiro geofone da linha).	46
Figura 21: Escala utilizada na confecção do modelo 3D de Eletrorresistividade. ZBR - Zonas de Baixa Resistividade aparente; ZIR - Zonas de Resistividade aparente Intermediárias; ZAR - Zonas de Alta Resistividade aparente.	46
Figura 22: Modelo tridimensional (3D) de eletrorresistividade da Barragem BR de Catalão .	47
Figura 23: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Baixa Resistividade (ZBR) da Barragem BR de Catalão	48

Figura 24: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR) da Barragem BR de Catalão.	48
Figura 25: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Alta Resistividade (ZAR) da Barragem BR de Catalão.	49
Figura 26: Seções L-01 e L-02 de eletrorresistividade adquiridas na região de praia do barramento.	50
Figura 27: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 01. Em detalhe, seção L-01 de Eletrorresistividade (CE). A - Detalhes das ZBR e ZAR no início de perfil.	50
Figura 28: Seções L-03 a L-15 de eletrorresistividade adquiridas na região do maciço.	51
Figura 29: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-03 de Eletrorresistividade (CE).	52
Figura 30: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-12 de Eletrorresistividade (CE).	52
Figura 31: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-04 de Eletrorresistividade (CE).	53
Figura 32: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Seção L-13 de Eletrorresistividade (CE), com destaque na zona de baixa resistividade próxima a ombreira esquerda.	54
Figura 33: Seções L-16 a L-23 de eletrorresistividade adquiridas de modo paralelo ao eixo do barramento, na região de inflexão do maciço e próximo à Ombreira Esquerda (O.E).	55
Figura 34: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 03. Em detalhe, seção L-17 de Eletrorresistividade (CE).	55
Figura 35: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 03. Em detalhe, seção L-21 de Eletrorresistividade (CE).	56
Figura 36: Vista aérea da Barragem BR de Catalão com a estrutura de espigotamento. Onde pode ser observado o espigotamento ocorrendo na Baía 5, entre o geofone 4 e 3.	57

Figura 37: Histórico de mudanças de velocidade registradas por cada sensor do sistema de monitoramento, ao longo de todo o monitoramento. Os dados de pluviometria contidos no gráfico foram fornecidos pela MOSAIC.	57
Figura 38: Vista dos espigotes na barragem.	58
Figura 39: Histórico de mudanças de velocidade registradas por cada sensor do sistema de monitoramento, ao longo de todo o monitoramento. Caixas pretas marcam os períodos chuvosos enquanto a caixa vermelha marca o período que ocorreu espigotamento.	59
Figura 40: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-01.	60
Figura 41: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-02.	60
Figura 42: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-03.	61
Figura 43: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-04.	61
Figura 44: Escala utilizada na confecção do modelo 2D de MASW, em que valores mais claros indicam menores velocidades. (<188 m/s).	62
Figura 45: Seção 2D de variação de Vs em profundidade ao longo da linha L-01.	62
Figura 46: Seção 2D de variação de Vs em profundidade ao longo da linha L-02.	63
Figura 47: Variação de velocidade (%) no período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem.	64
Figura 48: Variação de velocidade (%) no período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem, em conjunto com o gráfico de pluviosidade e de espigotamento.	64
Figura 49: Variação de velocidade (%) após o período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem.	65
Figura 50: Interpolação dos dados das MASW realizado no <i>Leapfrog Geo</i> na Barragem de Catalão.	66
Figura 51: Regiões com Vs Baixa <180m/s.	66

Figura 52: Corte no modelo 3D de eletrorresistivade em conjunto com a seção da L-01 do MASW.....67

Figura 53: Corte no modelo 3D mostrando a extensão das regiões de baixas velocidades associadas a zonas de baixa resistividade.....70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classes de eventos sísmicos por magnitude, onde a escala de comprimento e deslocamento são aproximadas se baseando numa queda de tensão de 3 Mpa (Eaton et al., 2016).....	35
Tabela 2: Categorização de solos a partir de Vs30 (UBC, 1997).....	68

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
<i>Disclaimer</i>	vi
Resumo.....	viii
<i>Abstract</i>	ix
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xv
1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO	19
3. LOCALIZAÇÃO DA BARRAGEM DE ESTUDO	19
4. GEOLOGIA REGIONAL	20
4.1. <i>Complexo de Catalão I</i>	22
4.2. <i>Barragem BR de Catalão</i>	23
5. A BARRAGEM BR DE CATALÃO	24
5.1. <i>Histórico</i>	24
5.2. <i>Configuração Atual</i>	24
5.2.1. Sistema de drenagem interna.....	25
5.2.2. Sistema Extravasor	25
5.2.3. Fundação	26
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
6.1. <i>Eletrorresistividade</i>	27
6.1.1. Aquisição dos dados de eletrorresistividade na Barragem BR.....	30
6.2. <i>Métodos Sísmicos</i>	31
6.2.1. Sismicidade	31
6.2.2. Microssísmica.....	35
6.2.3. Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente.....	36
6.2.4. Aquisição dos dados da Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente na Barragem BR.....	40

6.3. MASW (<i>Multi-Channel Analysis of Surface Waves</i>)	41
6.3.1. Aquisição dos dados de MASW (<i>Multi-Channel Analysis of Surface Waves</i>)na barragem BR.....	44
7. RESULTADOS.....	46
7.1. <i>Eletrorresistividade</i>	46
7.1.1. Grupo 01 - Seções Adquiridas na região da praia	49
7.1.2. Grupo 02 - Seções Adquiridas na região do maciço	51
7.1.3. Grupo 03 - Seções Adquiridas na região de inflexão do maciço e próximo à Ombreira Esquerda (O.E).....	54
7.2. <i>Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente</i>	56
7.3. <i>MASW</i>	59
7.3.1. Modelos de Vs 1D.....	59
7.3.1. Modelos de Vs 2D.....	61
8. DISCUSSÃO	63
9. CONCLUSÃO	69
10. Referencias Bibliográficas	71

1. INTRODUÇÃO

A mineração, sendo um setor fundamental da economia brasileira, está amplamente distribuída por todo o território nacional. Devido a tamanha produção, o Brasil ocupa a quarta posição no ranking mundial de países mineradores, destacando-se internacionalmente como produtor de minério de ferro, bauxita, manganês e nióbio (IBRAM, 2013). O crescimento da mineração nos últimos anos levou a um aumento na quantidade de rejeitos produzidos (CUNHA, 2018 e MACHADO 2007), na capacidade de armazenamento e na construção de novas barragens de rejeitos.

As barragens representam a principal infraestrutura geotécnica destinada à contenção de água, sedimentos e resíduos, sendo as barragens de rejeitos algumas das maiores estruturas construídas pelos engenheiros geotécnicos (NIMBALKAR et al., 2018). Possuindo dimensões variadas, são projetadas para conter o volume de resíduo produzido em uma determinada atividade minerária. Ao longo de sua vida útil, essas estruturas podem passar por alteamentos para ampliar sua capacidade de armazenamento.

Como resultado desse aumento na capacidade de armazenamento dos reservatórios, qualquer alteração ou dano no barramento pode acarretar graves prejuízos ao meio ambiente, à empresa que opera a barragem e à sociedade, especialmente a que vive nas redondezas da mina. Devido às suas características e peculiaridades, as barragens de rejeito são mais suscetíveis a falhas do que as barragens de retenção de água (OLIVIER et al., 2017). Os recentes rompimentos das barragens de Fundão (2015) e da Barragem I da Mina de Córrego do Feijão (2019) no Brasil, são exemplos dos impactos humanos, sociais, ambientais e econômicos que estes acidentes podem causar (LIMA et al., 2020).

Para prevenir novos acidentes envolvendo essas estruturas, é necessário prover um monitoramento correto e eficiente, que assegure a integridade e segurança física e operacional da barragem.

Usualmente, essas estruturas são monitoradas através de instrumentação geotécnica e inspeções visuais periódicas (Machado, 2007). Esses métodos examinam deslocamentos no maciço, deformações e tensões, erosões, níveis piezométricos na fundação, pressões e vazão de água. É por meio dessa instrumentação e inspeções visuais que se acompanha o desempenho das estruturas e da fundação durante as fases de construção e enchimento do reservatório.

Embora o monitoramento direto, utilizando piezômetros, indicadores de nível d'água e outros instrumentos comuns em barragens, seja eficaz e amplamente aceito na indústria da

mineração, ele se limita a fornecer dados pontuais sobre a estrutura da barragem. Para aprimorar a eficácia desse monitoramento, tem sido promovida a integração com métodos geofísicos, que oferecem uma visão mais abrangente e contínua das condições da barragem.

Os métodos geofísicos oferecem imagens contínuas da subsuperfície, possibilitando não só a caracterização da estrutura, mas permitindo o diagnóstico, junto a análises geotécnicas, de eventuais irregularidades em seus componentes construtivos. A utilização de métodos geofísicos em barragens de rejeito no país ainda não é uma prática usual. Adicionado a esse fato, os acidentes recentes, envolvendo estas estruturas, demonstram a necessidade do desenvolvimento de novas técnicas que permitam o aperfeiçoamento dos métodos de monitoramento já existentes.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar como a geofísica pode fornecer informações complementares ao monitoramento clássico (piezômetros e INAs nas barragens). Realizando uma análise dos dados de eletrorresistividade e de MASW em um ambiente tridimensional, em conjunto com o monitoramento microssísmico, com o intuito de identificar possíveis zonas de umidade ou percolação na estrutura da barragem.

3. LOCALIZAÇÃO DA BARRAGEM DE ESTUDO

A Barragem de Rejeitos BR está situada no córrego Fundo, afluente do rio São Marcos, sendo este contribuinte da bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

O reservatório da barragem, juntamente com o maciço principal e o sistema extravasor, estão localizados no município de Catalão, estado de Goiás, na área de lavra do Complexo Minerquímico de Catalão (CMC). A mina pertencente ao CMC e sua usina de beneficiamento encontram-se instaladas na região do Chapadão (Fazenda Chapadão), a cerca de 20 km de distância da cidade de Catalão, situada na zona rural do município. O acesso a essa área é feito pelas rodovias federais BR-050 e estaduais GO-330, que conectam, respectivamente, este município à capital federal, Brasília, e à capital do estado de Goiás.

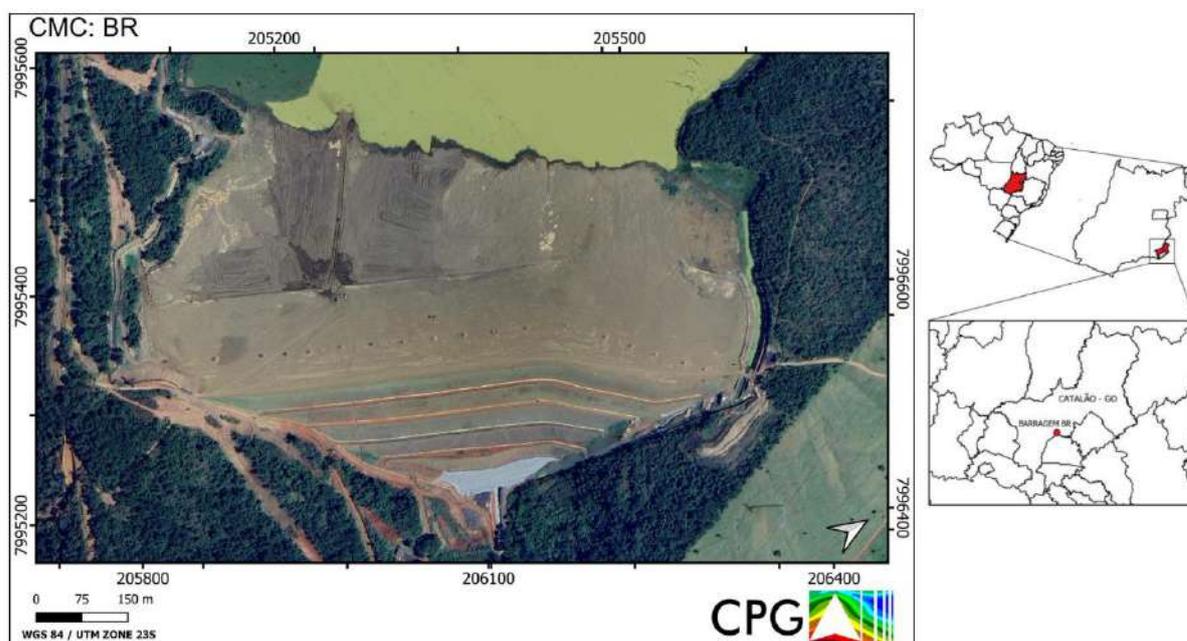


Figura 1: Imagem de satélite (Google Earth, 2023) mostrando a localização da barragem pertencente ao Complexo Minerológico de Catalão.

4. GEOLOGIA REGIONAL

A região de Catalão situa-se na região sudeste do Estado de Goiás, no contexto geotectônico da Província Tocantins) (Figura 2). Almeida (1977), individualizou dez províncias estruturais no Brasil, baseado nas feições tectono-estratigráficas, dentre as quais estão as Províncias do São Francisco, Paraná e Tocantins. A Província Tocantins, interesse do atual trabalho, é uma unidade tectônica Neoproterozóica desenvolvida durante a colagem orogênica Brasileira que ocorreu na região central do Brasil (Almeida et al., 1977). Compreende três cinturões dobrados, denominados faixas Brasília, Araguaia e Paraguai, resultantes da colisão de três blocos continentais (Cráton Amazônico a oeste, Cráton São Francisco a leste e a sudoeste o Cráton Paranapanema) durante a amalgamação do Gondwana Oriental (Delgado et al., 2003).

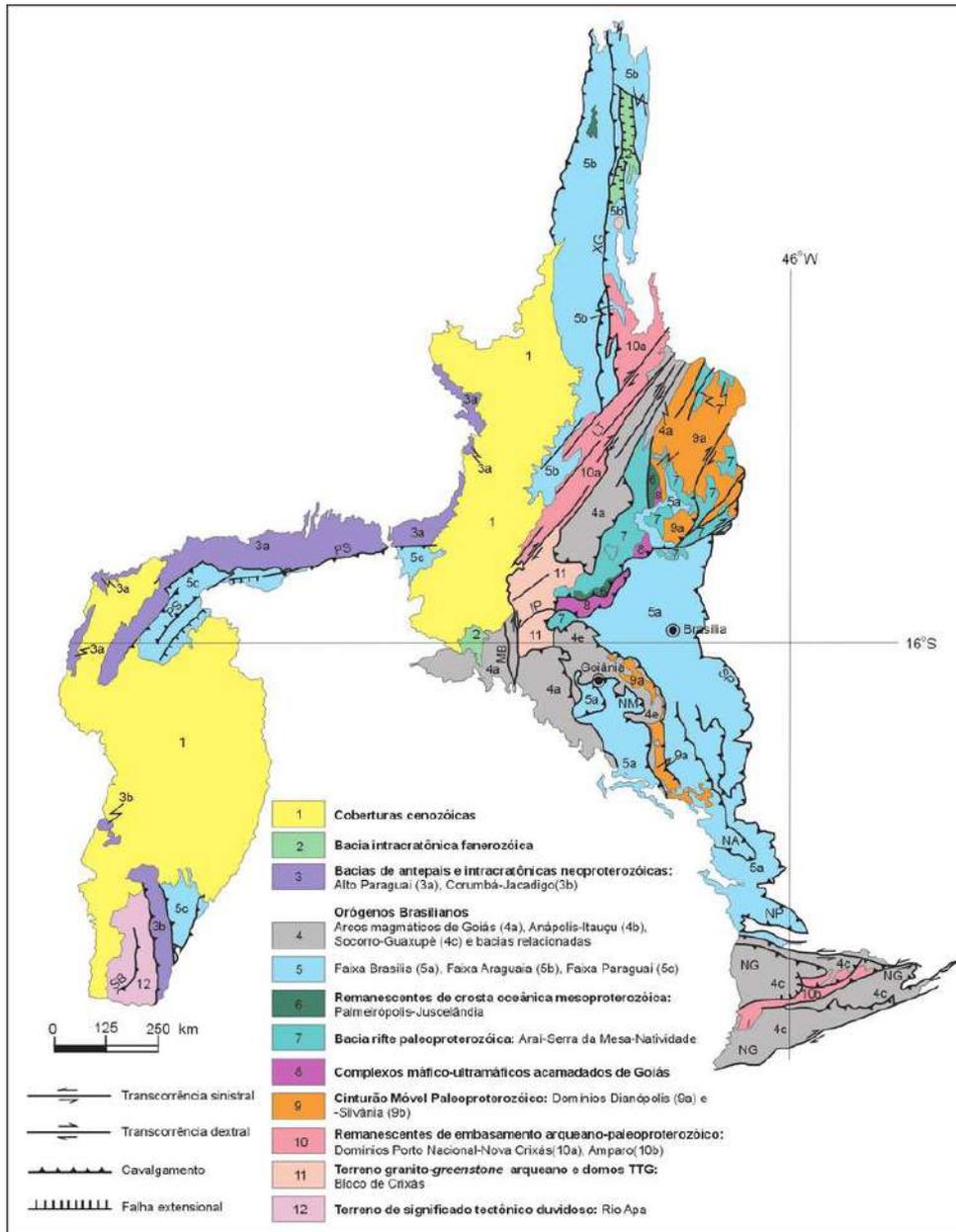


Figura 2: Província Tocantins (Fonte: CPRM, 2008).

A área de estudo, destaca-se associações migmatíticas, sequências metavulcanos sedimentares, granitóides sin a tardi tectônicos, além de complexos alcalinos associados.

O Grupo Araxá, inserido na Província Tocantins, foi inicialmente definido como Formação Araxá, por Barbosa (1955), composta por xistos verdes, micaxistos e migmatitos, estendendo-se posteriormente sua área de ocorrência para do Estado de Goiás (Barbosa, 1963), tendo sido elevada à categoria de Série, por Barbosa et al. (1966). O termo Grupo passou a ser utilizado por Barbosa et al. (1970), subdividindo-o em unidades A e B, em que a primeira seria representadas por quartzitos, micaxistos com granada, turmalina e/ou cordierita e rochas feldspáticas, enquanto a unidade B representada por lentes de calcário micáceo com

intercalações de quartzito. Estas rochas apresentam-se bem estruturadas, com foliação marcante, finamente espaçada. Foram realizadas algumas medições da foliação, observando-se atitudes variando entre N65 e 85W, mergulhando sempre para NE, com 25 a 35° (Novaes, 2018).

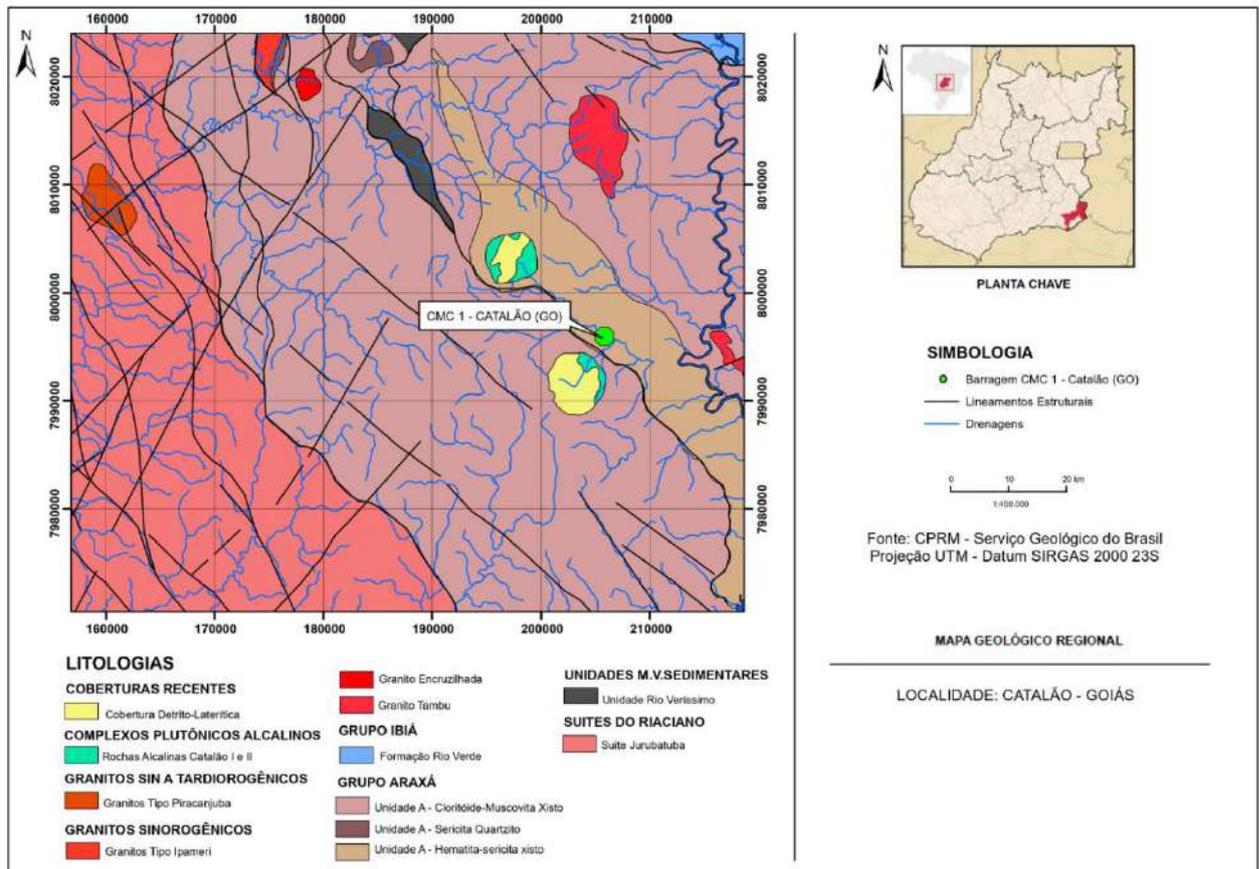


Figura 3: Mapa Geológico Regional do sudeste do estado de Goiás, com a área de estudo demarcada. (Fonte: NEOGEO)

4.1. Complexo de Catalão I

O complexo de Catalão I se apresenta como uma intrusão aproximadamente circular, com cerca de 6 km N-S e 5.5 km E-W. O complexo intrude quartzitos, xistos e filitos do Grupo Araxá (Proterozóico Superior). Os tipos litológicos incluem dunitos, clinopiroxenitos, bebedouritos, carbonatitos e foscrito, além de abundantes flogopititos metassomáticos (Brod et al., 2004). Este complexo possui um centro dominado por um corpo carbonatítico, onde predomina a variedade dolomítica sobre a calcítica. A porção externa é, da mesma forma, composta por rocha ultramáfica, flogopitizadas (Figura 4).

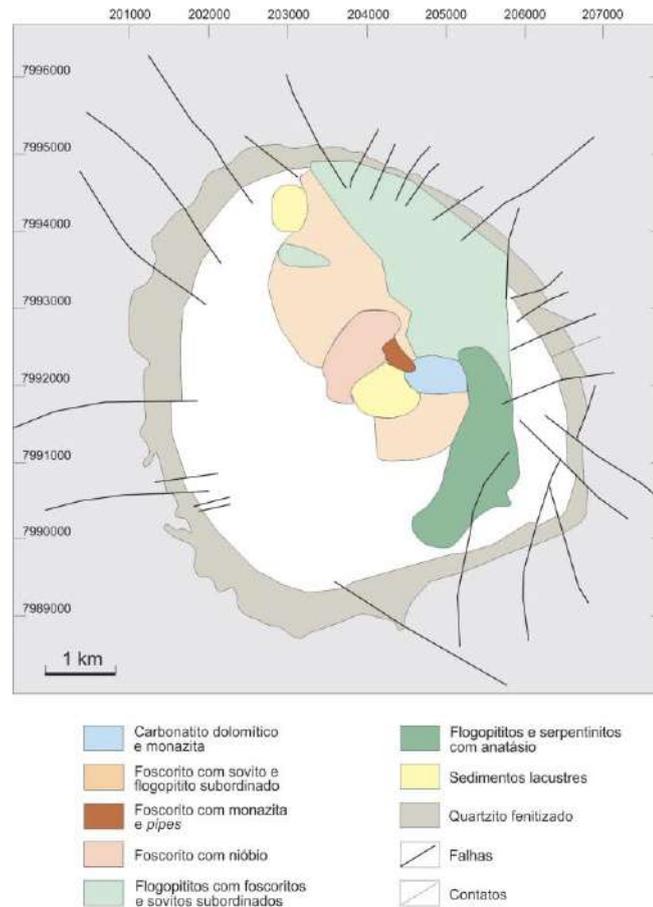


Figura 4: Mapa geológico do complexo alcalino ultramáfico-carbonatítico de Catalão I mostrando a distribuição das áreas mineralizadas (Ribeiro, 2008).

A rocha flogopitítica, resultante da interação das rochas alcalinas ultramáficas primárias com carbonatitos intrusivos (Brod et al., 2001), é o tipo petrográfico dominante no complexo, o que demonstra o intenso auto-metassomatismo que afetou Catalão I (Cordeiro, 2010). Enquanto isso, fosforito e carbonatito ocorrem como enxames de diques, ao invés de intrusões massivas, e tornam-se cada vez mais comuns em direção ao centro do complexo (Cordeiro, 2010).

Catalão I possui uma grande diversidade de mineralizações, incluindo apatita, pirocloro, monazita, anatásio, barita, magnetita e vermiculita (Gibson et al., 1995; Ribeiro, 2008). Atualmente, o perfil de intemperismo sobre rochas da série fosforita é explorado em busca de fosfato, nióbio e barita (como subproduto).

4.2. Barragem BR de Catalão

A barragem de rejeitos encontra-se instalada sobre rochas da Unidade A, inserida, de forma regional, nas fácies hematita-sericita xisto da mesma (Figura 3). A geologia no local da Barragem BR é caracterizada predominantemente pela presença de rochas do tipo xistos, com ocorrência secundária de filitos, intercaladas com quartzitos, pertencentes ao Grupo Araxá, de

idade Pré-Cambriana. Essas rochas constituem as encaixantes do domo ultrabásico alcalino conhecido como Catalão I e exibem uma estrutura bem definida, com uma foliação altamente pronunciada e finamente espaçada.

5. A BARRAGEM BR DE CATALÃO

A barragem BR possui a função de conter os rejeitos gerados pelo beneficiamento de rocha fosfática, no qual são produzidos concentrados de potássio, fosfato, e nitrogênio em pequenas escalas, os quais são utilizados pela indústria para fabricação de fertilizantes agrícolas.

5.1. Histórico

As estruturas da Barragem BR foram construídas em quatro etapas construtivas que se sucederam ao longo do tempo, de acordo com as demandas da planta de beneficiamento. A barragem foi construída a partir de um aterro primitivo executado com solo argiloso, sucedido por três etapas de alteamento utilizando rejeitos ciclados compactados. (NEOGEO, 2018)

Por último, entre 2019 e 2022, foram executadas obras de adequação da estrutura da barragem com o objetivo de reverter o maciço em uma configuração do tipo 'linha de centro', assegurando a conformidade com os padrões atuais de segurança.

Por último foram realizadas obras de adequação da estrutura, visando descaracterizar a estrutura obtendo, assim, uma geometria que atende aos fatores de segurança mínimos exigidos pela legislação vigente.

5.2. Configuração Atual

O aterro atual possui uma extensão de aproximadamente 1.040 m, com crista nivelada na cota de 778 m, e uma largura média de 30 metros. Atualmente operando com uma lâmina d'água na cota de 770 m, o aterro forma um reservatório com uma área total de 695 hectares, destinado ao armazenamento de rejeitos industriais lançados na forma de lama e água para reutilização no processo de beneficiamento do minério (NEOGEO, 2018).

O talude de jusante se inicia a partir de um enrocamento do dreno de pé, próximo ao terreno natural, na cota aproximada de 722 m. Esse talude é caracterizado por seis bermas de equilíbrio. Em relação à proteção superficial, o talude de jusante, composto por rejeitos, apresenta uma vegetação rasteira de gramíneas e dispositivos de drenagem de águas pluviais. Por outro lado, o talude de montante é protegido por uma extensa praia de rejeitos (NEOGEO, 2018).

5.2.1. Sistema de drenagem interna

É composto por tapetes drenantes que direcionam as águas coletadas do aterro para um cordão de enrocamento situado na base do talude de jusante, enquanto os tapetes instalados nas bermas deságuam nas canaletas de drenagem das águas superficiais, instaladas nas bermas do talude de jusante. Essas águas são conduzidas por meio de tubos de drenagem inseridos no interior do tapete até um canal, onde são restituídas ao córrego.

Durante o terceiro alteamento, que resultou na elevação da crista da barragem até a cota atual, foi implementado um sistema de drenagem sobre a superfície prévia da crista do aterro, situada na elevação de 773 metros. Esse dreno tem uma largura de aproximadamente 10 metros e se estende ao longo de todo o comprimento do aterro.

O tapete drenante é composto por uma estrutura em camadas, iniciando-se com uma camada inferior de areia sobreposta por uma camada intermediária de brita, seguida por uma camada superior de areia, com espessura total de 1 metro. No interior da camada de brita, foram escavadas valas para a instalação dos tubos drenos, destinados a coletar e direcionar as águas percoladas até o ponto de deságue nas canaletas localizadas na berma de jusante.

5.2.2. Sistema Extravasor

O sistema extravasor está posicionado na Ombreira Esquerda da estrutura e é constituído por um canal de aproximação escavado no terreno natural acoplado a um canal de saída em concreto, conforme ilustrado na Figura 5.

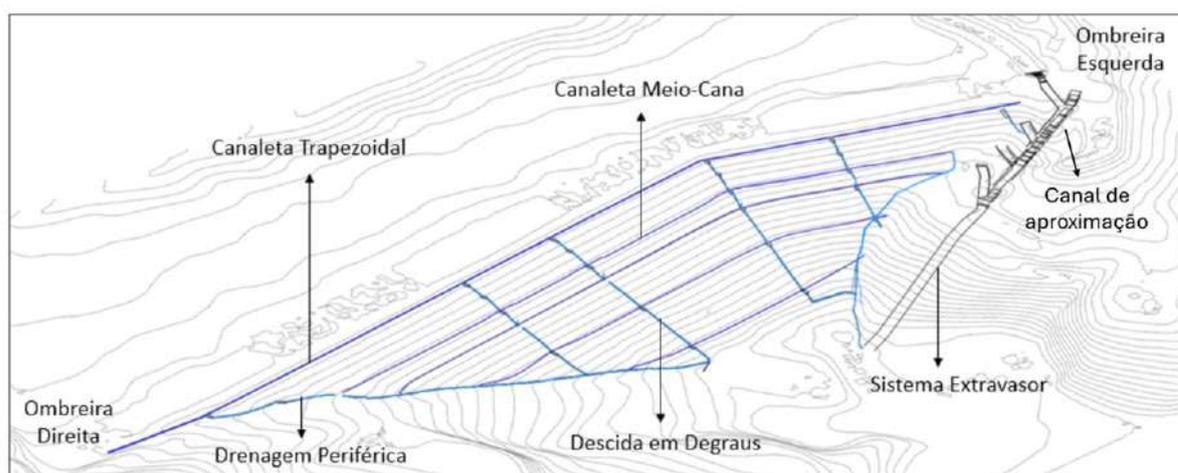


Figura 5: Principais estruturas de drenagem externa da Barragem BR do Complexo Minerquímico de Catalão (NEOGEO, 2018).

O canal de aproximação possui 160 metros de comprimento por 8 metros de largura. A seção do vertedouro, constituída por concreto armado, possui 45 metros de extensão, com

soleira posicionada na cota 772 metros. A estrutura extravasora está conectada ao canal rápido, o qual possui 350 metros de comprimento, também construído em concreto armado, apresentando uma seção retangular com altura variável, e equipado com uma série de escadas dissipadoras de energia da água, até a bacia de amortecimento para a posterior devolução ao leito do córrego Fundo.

5.2.3. Fundação

A seção típica da barragem, elaborada a partir de dados de sondagem (PATROL, 2011), apresenta cinco tipos principais de materiais, descritos, do topo para a base, como:

- Rejeito: Rejeito arenoso, cor acinzentada, composição micácea, pouco a medianamente compacto;
- Aterro Argilo-siltoso: Coloração avermelhada, presença de pedregulhos dispersos, consistência rija a dura;
- Solo Coluvionar: Solo de composição argilo-siltosa, presença de pedregulhos finos dispersos, coloração avermelhada, consistência média a rija;
- Solo Residual: Silto-argiloso, por vezes de composição silto-arenosa, bem estruturado, micáceo, cor predominantemente acinzentada a amarelada. Consistência rija a dura, em profundidade, mas com passagens de consistência média;
- Rocha Xistosa: Medianamente alterada, muito fraturada, cor predominante cinzenta.

A Barragem BR de Catalão apresenta ombreiras com uma cobertura coluvionar pouco espessa, constituída por argila siltosa de coloração avermelhada. Abaixo deste material, foi identificado um solo residual com características silte-argiloso a silte-arenoso, com composição grafitosa e foliação reliquiar, com mergulho variando de 20° a 35° para NE (em direção à Ombreira Esquerda). Subjacente ao solo residual, encontra-se uma rocha com xistosidade preservada e coloração variada (cinza esverdeada e amarelada), com grau de alteração pouco a medianamente pronunciado.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos geofísicos têm demonstrado ser de grande utilidade na prospecção em subsuperfície, sobretudo na identificação de zonas úmidas e na distinção de materiais nas estruturas de contenção, proporcionando resultados satisfatórios (Ribeiro et al. 2023 e. Albuquerque et al, 2019)

Para a investigação geofísica realizada na barragem BR de Catalão, foram utilizados os métodos de Eletrorresistividade (Caminhamento Elétrico), sísmica pela *Multi-Channel Analysis of Surface Waves* (MASW) e a Microssísmica, pela abordagem da Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente.

6.1. Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade é fundamentado no estudo da variação do potencial elétrico e determinação da resistividade dos materiais (TELFORD et al. 1990).

Esse método emprega uma corrente elétrica artificial introduzida no terreno através de dois eletrodos de corrente (denominados A e B) com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos de potencial (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente (Figura 6). Sendo possível identificar regiões em subsuperfície que apresentam maior ou menor resistividade (LAGO et al. 2006)..

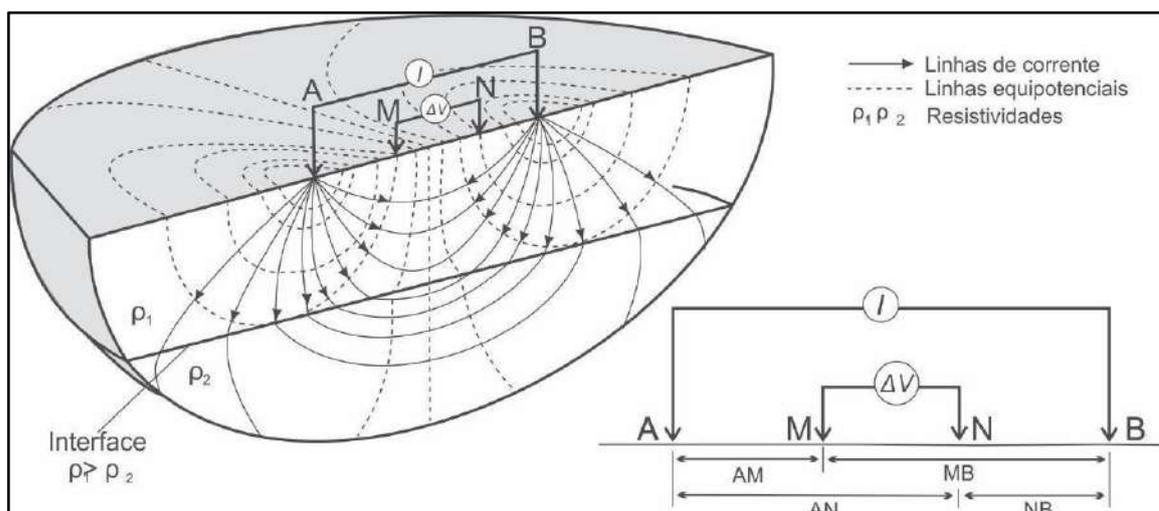


Figura 6: Esquema de aquisição da resistividade por meio de um arranjo de quatro eletrodos, com os eletrodos de potencial M e N posicionados entre os eletrodos de corrente A e B. (Fonte: Modificado de KNÖDEL et al, 2007)

A resistividade elétrica depende de muitos fatores, como a porosidade, a resistividade elétrica do fluido contido nos poros, a composição do solo, grau de saturação, orientação e forma das partículas e estrutura do poro (Abu-Hassanein et al., 1996).

Dessa forma, podemos observar que a resistividade dos solos e rochas tendem a diminuir com o aumento da umidade e da quantidade de sólidos dissolvidos na água intersticial. Isso ocorre porque materiais arenosos, que são compostos principalmente por quartzo, geralmente apresentam maior resistividade, enquanto materiais argilosos tendem a ser condutores eficazes de corrente elétrica quando contêm água em seus poros.

Adicionalmente, é importante destacar que a resistividade dos sedimentos não-saturados é substancialmente maior do que a resistividade desses mesmos sedimentos quando se encontram completamente saturados com água. A água exerce uma influência significativa sobre a resistividade, tornando as zonas saturadas mais condutivas do que as não saturadas. Além disso, a quantidade de sais dissolvidos na água desempenha um papel crucial, uma vez que níveis mais elevados de sais dissolvidos resultam em menor resistência.

Sendo assim, a resistência elétrica (R), expressa em ohms, consiste na capacidade que um corpo possui de se opor à passagem de uma corrente, e varia em função da diferença de potencial (V), medida em volts, e da corrente (i) que atravessa o material, medida em amperes (HALLIDAY et al., 1993). Essa relação de proporcionalidade é regida pela Lei de Ohm, expressa pela equação:

$$\Delta V = i R$$

Conseqüentemente, a resistência elétrica de um material está intrinsecamente ligada à sua natureza e ao estado físico, podendo ser expressa, em laboratório, pela resistência de um cilindro condutor e homogêneo (Figura 7). Nesse cenário, tanto a área quanto o comprimento desse cilindro são considerados unitários.

A resistência elétrica, assim, depende de três variáveis associadas ao corpo condutor: o comprimento (L), expresso em metros, a área da seção transversal (A), medida em metros quadrados, e a resistividade (ρ), cuja unidade é ohm-metro.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

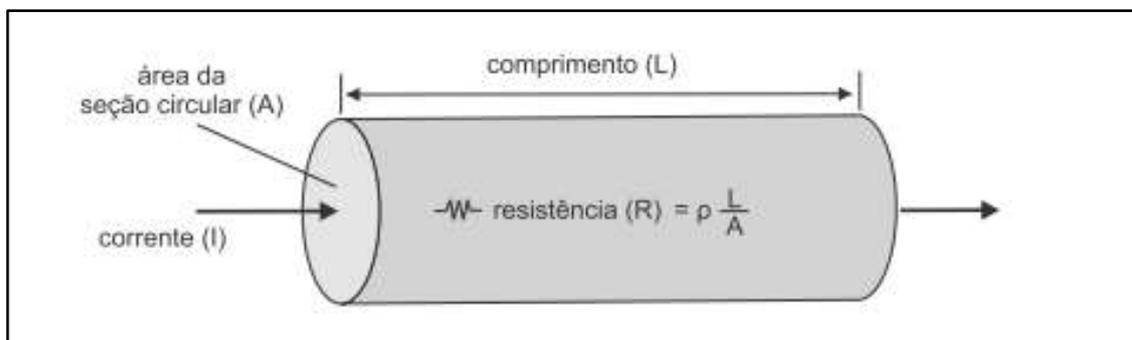


Figura 7: Fluxo de Corrente em um corpo cilíndrico (Fonte: Knödel et al. 2008.)

Assim, para calcular a resistividade, é crucial determinar a diferença de potencial (ΔV) entre os eletrodos M e N. Isso envolve o cálculo do potencial resultante do campo elétrico nos

eletrodos M e N (V_m e V_n), utilizando as fórmulas de Ohm a seguir. Esses cálculos são realizados sob a suposição de que o meio é homogêneo e isotrópico.

$$V_m = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad e \quad V_n = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

Assim, a diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos MN é dada por:

$$\Delta V_{mn} = V_m - V_n$$

Podendo ser reescrita como:

$$\Delta V_{mn} = i \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Sendo assim, a resistividade (ρ) é determinada pela intensidade da corrente que atravessa o subsolo (i), pela configuração geométrica dos eletrodos (K) e pela diferença de potencial (V_{mn}) medida pelos eletrodos receptores. A expressão que descreve a resistividade é a seguinte:

$$\rho = \frac{V_{mn}}{i} K, \quad \text{onde } K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

Neste estudo, o método foi aplicado por meio do arranjo dipolo-dipolo, que permite a utilização de múltiplos eletrodos de recepção (M e N) ao longo da linha de aquisição. Esse tipo de arranjo demonstra ser um dos métodos mais precisos e eficazes quando aplicado no campo (Canatto, 2021). Uma de suas principais vantagens é a capacidade de investigar a variação lateral de parâmetros físicos em diferentes níveis de profundidade, permitindo assim uma caracterização mais abrangente dos materiais na subsuperfície, tanto em termos horizontais quanto verticais.

O arranjo dipolo-dipolo pode ser definido a partir das seguintes características:

- Centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos, mas se deslocam ao longo da seção a ser levantada;
- Espaçamento entre os eletrodos A-B igual ao M-N;
- Espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se, simultaneamente, vários dipolos MN dispostos ao longo da seção;
- Cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação.

Nesse exemplo, cada dipolo MN corresponde a um nível de investigação (Figura 8). A profundidade teórica atingida em cada nível investigado é tomada, como sendo $Z = R/2$ (metros), onde R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN). Entretanto, na prática, essa relação é mais real se formada como sendo aproximadamente $R/4$ (BRAGA, 2006).

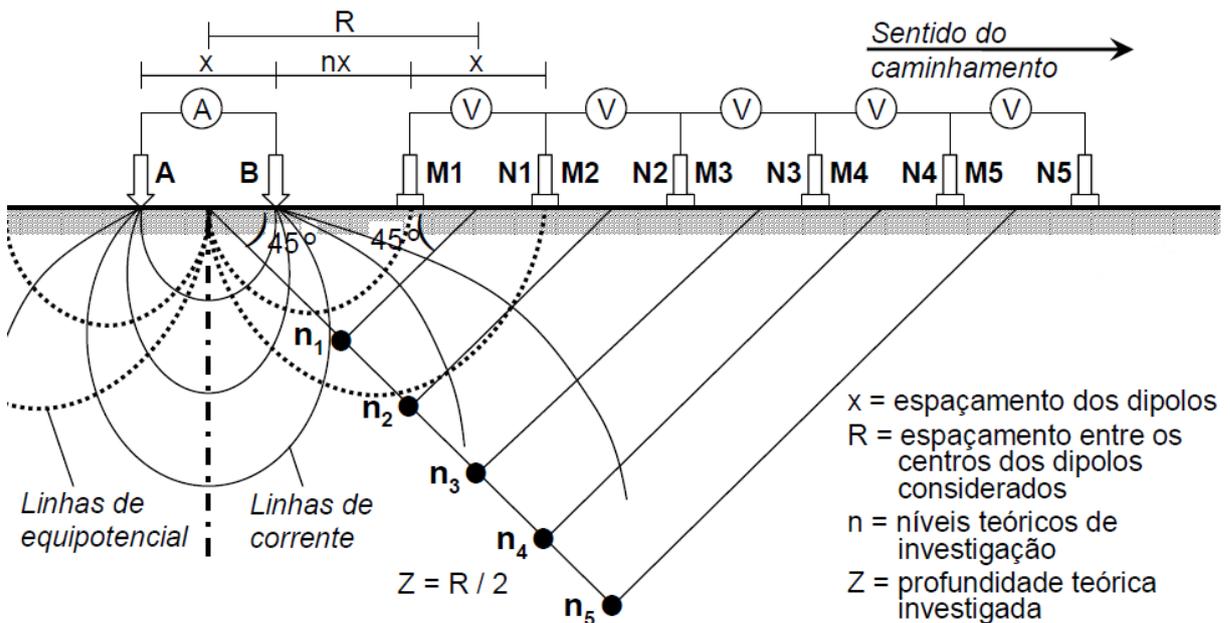


Figura 8: Desenho esquemático do arranjo dipolo-dipolo (Fonte: Braga, 2006).

6.1.1. Aquisição dos dados de eletrorresistividade na Barragem BR

A realização dos perfis geofísicos na barragem BR de catalão ocorreu entre os dias 16 de agosto de 2018 a 27 de novembro de 2018.

O equipamento utilizado no trabalho foi Supersting, da fabricante AGI, configurado com 84 canais e espaçamento variável entre eletrodos de 3,0 a 4,0 metros. Para atender ao objetivo proposto, foram realizadas 23 seções de Caminhamento Elétrico (CE), totalizando 10.775,69 metros. Estas seções foram posicionadas paralelamente à crista da barragem e distribuídas ao longo do corpo do maciço, praia e ombreiras da Barragem BR, conforme a seguinte disposição:

- L-01 e L-02: Adquiridas na região da praia do barramento, de modo paralelo ao eixo e com espaçamento entre linhas de 40 metros;
- L-03 a L-15: Adquiridas na região do maciço de modo paralelo ao eixo do barramento e com espaçamento entre linhas variável de 10 a 30 metros;

- L-16 a L-23: Adquiridas de modo paralelo ao eixo do barramento, na região de inflexão do maciço e próximo à Ombreira Esquerda (O.E). O espaçamento entre linhas foi variável de 17 a 40 metros.

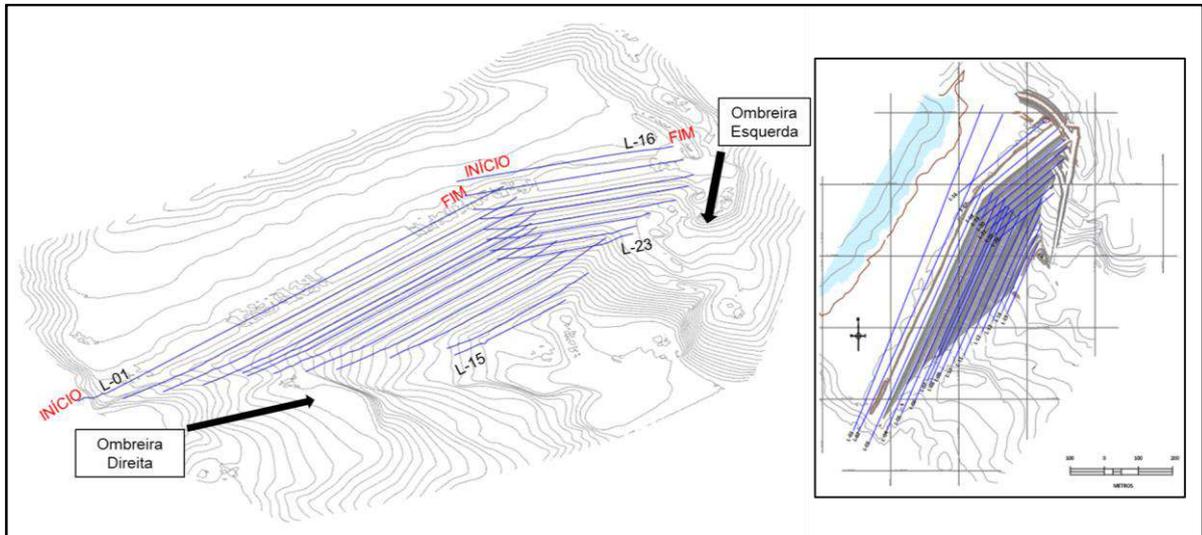


Figura 9: Disposição das 23 seções de caminhada elétrica (CE) ao longo da Barragem BR de Catalão.

Após etapa de aquisição em campo, os dados passaram por refinamento e/ou filtragem para uma posterior fase de processamento e inversão dos mesmos. O software utilizado para processamento dos dados elétricos foi o Res2DInv.

A fim de visualizar os resultados em um formato tridimensional, os dados já processados de Eletroresistividade foram exportados para o software LeapfrogGeo, onde foram modelados utilizando o método de modelagem implícita. Esse método permitiu a extração precisa dos pontos de contato, a geração de sólidos, e a realização de interpolações 3D

6.2. Métodos Sísmicos

6.2.1. Sismicidade

De acordo com Mendecki (2013), o conceito fundamental das ondas envolve o transporte de energia a partir de sua fonte através de um meio. É importante destacar que se trata da energia da onda em si, e não das partículas do meio que se deslocam a partir da fonte. As ondas sísmicas, também conhecidas como *ground motions* (Figura 10), são habitualmente registradas por meio de sismogramas e resultam da combinação entre a fonte sísmica e as características do meio por onde se propagam. O movimento das ondas pode ser categorizado como periódico randômico ou transitório (transiente).

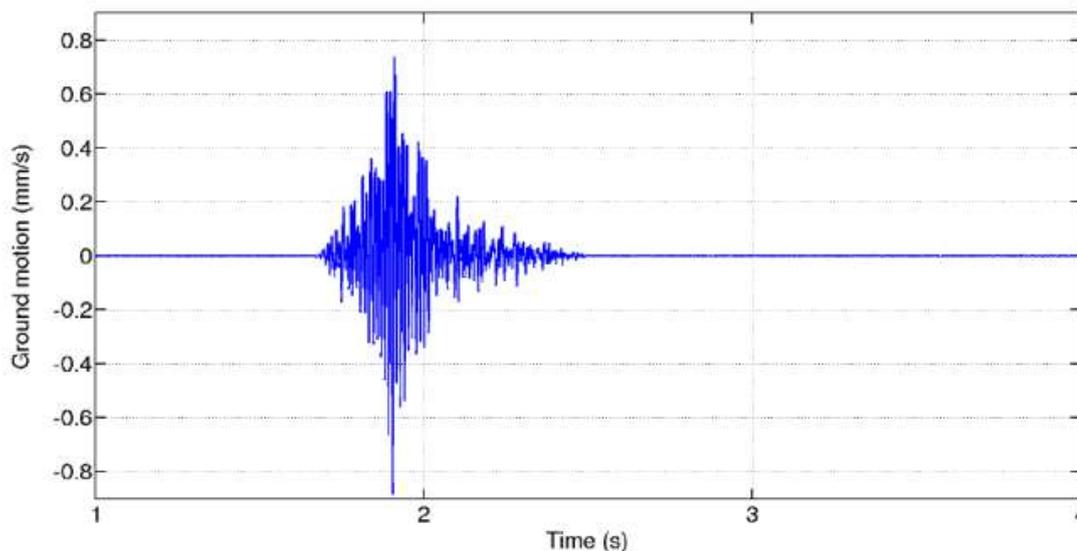


Figura 10: Sismograma obtido de uma detonação que gerou um pico de "ground motion" de aproximadamente 0,9 mm/s (DIAS et al., 2016).

Diversos tipos de ondas sísmicas são amplamente conhecidas, sendo as principais categorizadas como ondas de corpo (body waves) e ondas de superfície (surface waves). De acordo com Lowrie (2007), uma superfície na qual todas as partículas vibram em uma mesma fase é chamada de frente de onda (wavefront). Portanto, as ondas superficiais correspondem àquelas que se propagam na superfície da Terra a partir da fonte sísmica. Por outro lado, as ondas de corpo são aquelas que se propagam tridimensionalmente no interior do meio a partir da fonte sísmica, ou seja, elas se propagam pelo meio a partir do foco do evento sísmico.

As ondas de corpo consistem em dois tipos principais: as ondas compressoriais, também conhecidas como ondas primárias (onda P), e as ondas cisalhantes, chamadas de ondas secundárias (onda S). As ondas P (Figura 11a) se propagam de forma longitudinal, paralelamente à direção da propagação da onda, são também as mais rápidas dentre as ondas sísmicas e, portanto, são as primeiras ondas a atingir um ponto de referência. Além disso, as ondas P podem se propagar tanto através do ar quanto da água. Já as ondas secundárias (Figura 11b) se propagam de forma transversal, ou seja, perpendicularmente à direção de propagação da onda, correspondendo às ondas das deformações tangenciais (Lowrie 2007). As ondas S possuem uma velocidade inferior em comparação às ondas P e, conseqüentemente, atingem o ponto de referência posteriormente (Figura 12). Diferentemente das primárias, as ondas secundárias não se propagam em meios que não sejam sólidos, pois esses não possuem resistência ao cisalhamento para possibilitar a sua propagação.

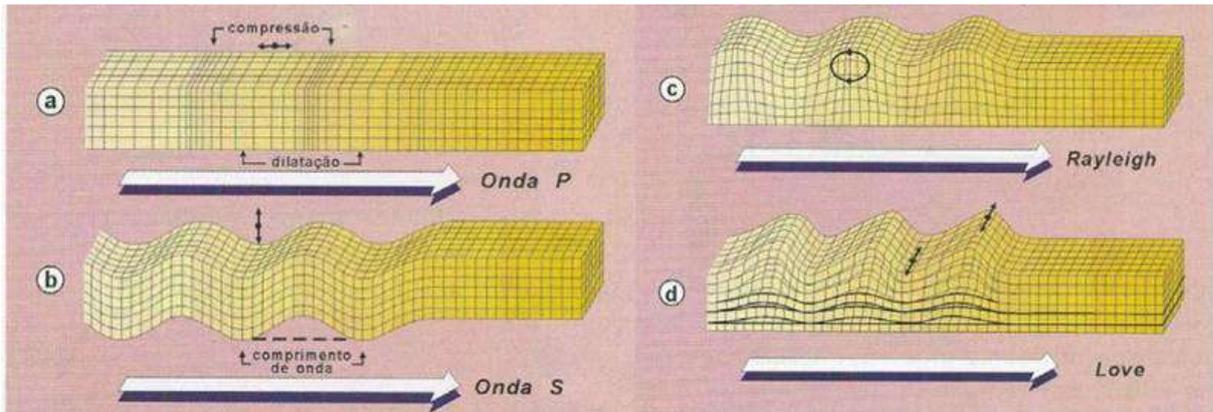


Figura 11: Principais modos de propagação das ondas sísmicas As ondas P (a) e S (b) são ondas de corpo, enquanto que as Rayleigh (c) Love (d) e são ondas superficiais. (Teixeira et al. 2008).

As ondas superficiais compreendem as ondas Rayleigh (Figura 11c) e as ondas Love (Figura 11d) que se propagam na superfície do meio a partir do epicentro de um evento sísmico. As ondas Love são caracterizadas por um movimento de cisalhamento com polarização horizontal e as ondas Rayleigh descrevem um movimento elíptico em um plano vertical que inclui a direção de propagação da onda. Elas diferem das ondas de corpo, pois são mais lentas, e apresentam frequências mais baixas, maiores amplitudes e também uma duração mais prolongada. Essas ondas exibem um comportamento dispersivo em que as componentes do seu comprimento de onda possuem velocidades distintas de propagação e, conseqüentemente, tempos de chegada diferentes, como mostra a Figura 12. Em virtude dessas características, as ondas superficiais são reconhecidas de maior energia associada e pelo maior potencial destrutivo, podendo ou não ocorrer em um evento microssísmico (Bizao & Oliveira 2018).

Observando a Figura 12, a onda P é identificada como a primeira perturbação perceptível nas vibrações, muitas vezes associada ao ruído ambiente ou ao nível basal. Em seguida, a onda S surge com uma amplitude mais significativa, enquanto as chegadas das ondas superficiais Love e Rayleigh são observadas posteriormente nos sismogramas.

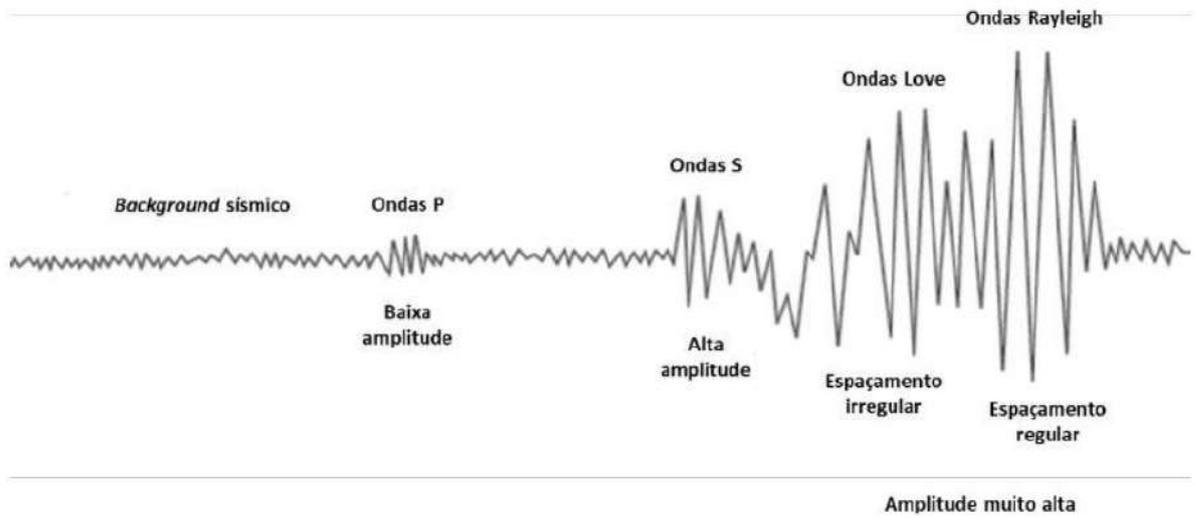


Figura 12: Representação de um sismograma típico indicando as chegadas dos diferentes tipos de ondas (modificado de Kusky 2008).

A determinação da posição de um evento sísmico envolve a análise dos tempos de chegada das ondas P e S, usando no mínimo três sensores. O processo de localização se baseia na interseção dos raios de influência de cada sensor, em que esses raios têm tamanhos que correspondem às distâncias calculadas a partir da diferença entre os tempos de chegada das ondas P e S, multiplicadas pela diferença nas velocidades de propagação dessas ondas. Cada sensor serve como o ponto central para a construção desses círculos de influência (Figura 13)

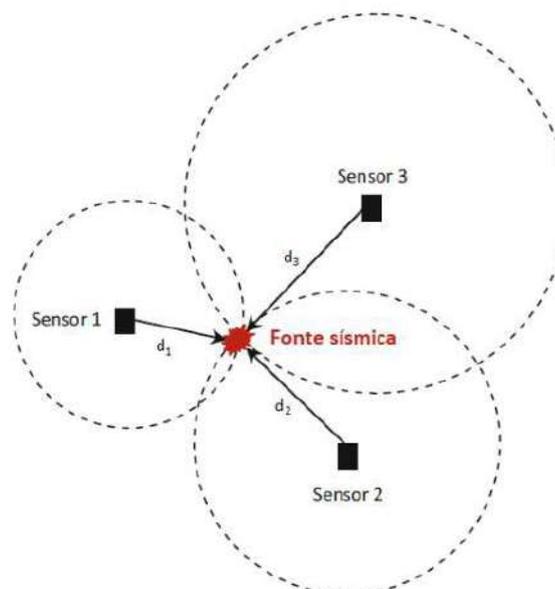


Figura 13: Localização de um evento sísmico a partir de três sensores (modificado de Xiao et al. 2016).

6.2.2. Microsísmica

Na mineração os sismos possuem escalas geralmente muito menores e por isso são considerados microsismos, sendo aplicados a eventos com magnitudes da ordem de -2 a 0 (Tabela 1), além de apresentar frequências mais altas, comprimentos de onda e durações mais curtos (Eaton et al. 2016).

Faixa de Magnitude	Classe	Escala de comprimento	Escala de deslocamento	Escala de frequência	Momento sísmico
8 – 10	Terremoto Regional	100 – 1000 km	4 – 40 m	0,001 – 0,1 Hz	1 kAk – 1 MAk
6 – 8	Terremoto Grande	10 – 100 km	0,4 – 4 m	0,001 – 1 Hz	1 Ak – 1 kAk
4 – 6	Terremoto Moderado	1 – 10 km	4 – 40 cm	0,01 – 10 Hz	1mAk – 1 Ak
2 – 4	Terremoto Pequeno	0,1 – 1 km	4 – 40 mm	1 – 100 Hz	1 μAk – 1mAk
2 – 0	miliseísmo ou microterremoto	10 – 100 m	0,4 – 4 mm	10 – 1000 Hz	1 nAk – 1 μAk
-2 a 0	Microsismo	1 – 10 m	40 – 400 μm	0,1 – 10 kHz	1 pAk – 1nAk
-4 a -2	Nanossismo	0,1 – 1 m	4 – 40 μm	1 – 100 kHz	1 fAk – 1pAk
-6 a -4	Picoseísmo	1 – 10 cm	0,4 – 4 μm	10 – 1000 kHz	1 aAk – 1fAk
-8 a -6	Femtossismo	1 – 10 mm	0,04 – 0,4 μm	1 – 100 MHz	1 zAk - aAk

Tabela 1: Classes de eventos sísmicos por magnitude, onde a escala de comprimento e deslocamento são aproximadas se baseando numa queda de tensão de 3 Mpa (Eaton et al., 2016).

Os sistemas de monitoramento microsísmico oferecem uma solução para monitorar de forma contínua e em tempo real a integridade física de estruturas geotécnicas. Além disso, esse sistema se configura como uma ferramenta essencial para orientar a implementação de medidas preventivas, a avaliação de riscos sísmicos e a emissão de alertas, conforme destacado por MENDECKI et al. (2010). Isso é possível por meio da criação de um banco de dados que registra a localização dos eventos sísmicos, suas propriedades, características e *ground motions*.

A utilização dessa tecnologia de monitoramento em barragens de rejeitos tem como objetivo a avaliação quantitativa das vibrações às quais a estrutura está sujeita, provenientes de detonações na mina ou eventos sísmicos naturais. Essa análise visa determinar se os *ground motions* registrados na estrutura apresentam algum potencial risco à sua estabilidade, contribuindo, assim, para a preservação de sua integridade.

Segundo Larsson (2004), a sismicidade induzida pela mineração (*mining induced seismicity*), opera com os mesmos princípios básicos dos terremotos, porém em uma escala

significativamente menor. De forma simplificada, esses mecanismos envolvem a gradual acumulação de tensão e energia de deformação que, em um determinado momento, é liberada abruptamente por meio de um deslocamento ao longo de uma falha. A previsão da ocorrência e magnitude de terremotos de grande escala é uma tarefa complexa, dado que esses eventos são influenciados por diversos fatores e ocorrem de maneira não muito frequente. Importante destacar que sismos induzidos pela atividade mineradora, bem como terremotos de menor magnitude, apresentam uma frequência maior, permitindo a aplicação de abordagens estatísticas e probabilísticas para uma compreensão e previsão mais precisa desses fenômenos.

No caso de barragens de rejeito, podem se destacar duas abordagens de monitoramento microsísmico para um mesmo arranjo de sensores: A microsísmica convencional e a interferometria sísmica do ruído ambiente.

6.2.3. Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente

A interferometria sísmica do ruído ambiente permite o monitoramento contínuo da variação de velocidade de propagação de ondas sísmicas, através dos princípios físicos que regem a técnica de interferometria de sinais usando do ruído ambiental como fonte passiva

Tanto atividades humanas quanto fenômenos naturais geram continuamente ondas sísmicas, contribuindo para a presença constante de ruído sísmico (Figura 14). Este ruído se revela como uma fonte passiva para o monitoramento de estruturas geotécnicas, como as barragens de rejeito. As ondas sísmicas provenientes desse ruído se propagam radialmente por extensas distâncias, penetrando a subsuperfície a profundidades significativas.

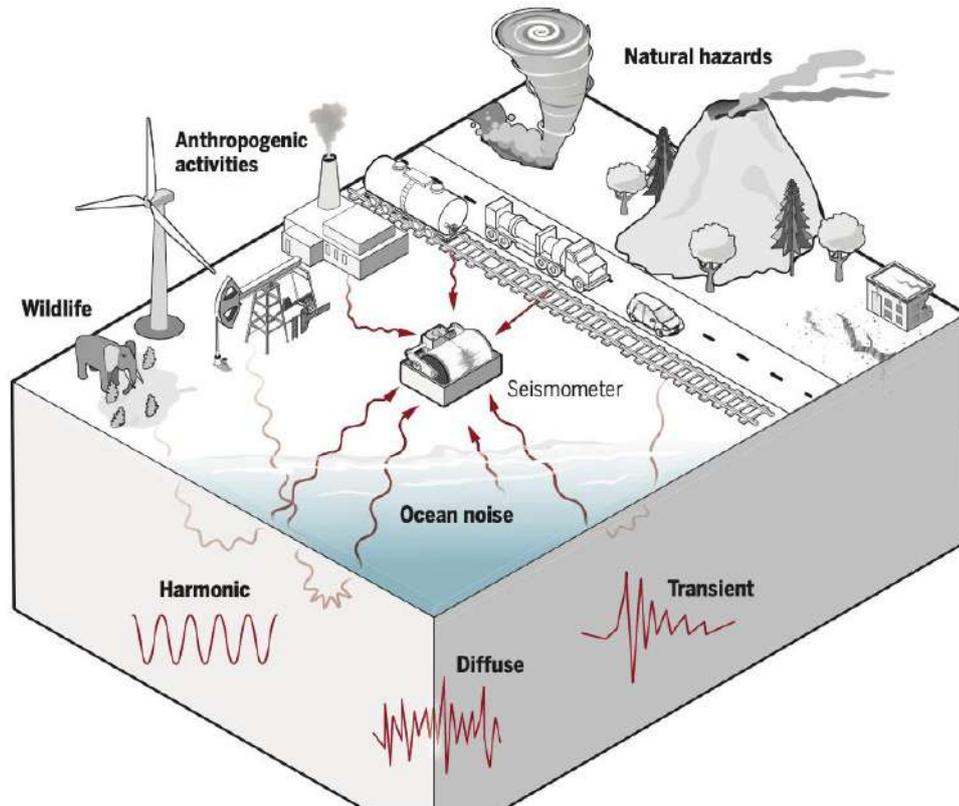


Figura 14: Os sismógrafos registram todas as vibrações disponíveis, não apenas os terremotos e detonações. Essas diversas fontes induzem ondas sísmicas com diferentes modos de vibração (harmônicos, difusos e transientes), que são detectáveis a grandes distâncias (DENOLLE; NISSENMEYER, 2020)

Para se monitorar um meio na sismologia, é necessário um sinal sísmico reproduzível se propagando nesse meio. Isso costumava ser alcançado exclusivamente com fontes ativas (explosivos, golpes de martelo, etc.) ou terremotos repetitivos moderados, mas nos últimos anos pesquisadores descobriram como usar apenas os sinais passivos como fonte (LAROSE, 2015).

Conforme representado por Wapenaar et al. (2010), a Figura 15 mostra o princípio da correlação cruzada de observações em dois receptores (geofone 1 e geofone 2), gerando uma resposta no geofone 2 como se houvesse uma fonte no geofone 1. Dividindo a distância entre os dois sensores pelo tempo de viagem estimado ($t_2 - t_1$), é possível calcular a velocidade de propagação no meio entre os geofones. Uma alteração na velocidade indica uma provável mudança na rigidez da área monitorada, que é um parâmetro importante para o acompanhamento da integridade física de uma estrutura.

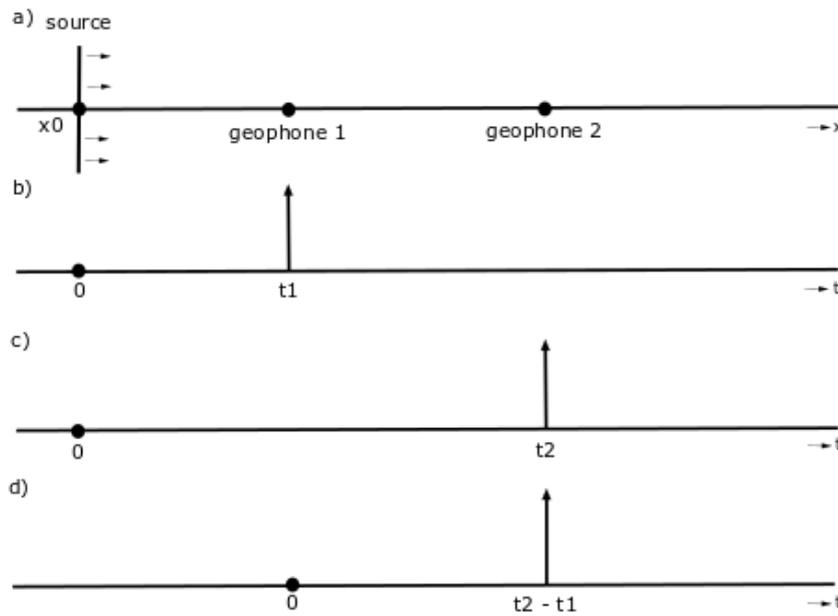


Figura 15: Representação da propagação de onda pela abordagem da interferometria sísmica. (a) Uma onda plana viajando ao longo do plano x emitida por uma fonte impulsiva em $x = x_0$ e $t = t_0$; (b) Resposta na observada no geofone 1, em $t = t_1$; (c) Resposta observada no geofone 2, em $t = t_2$; e (d) Correlação cruzada das respostas no geofone 1 e 2. (Modificado de Wapenaar et al. 2009).

Após a construção da fonte virtual, são obtidas alterações na velocidade sísmica. Normalmente, apenas a parte dispersa dos sinais da fonte virtual é considerada quando a medição é feita e as mudanças aparentes nas chegadas diretas são desprezadas. A coda sísmica corresponde a cauda do sismograma (Figura 16), representando a parte mais dispersa do mesmo. Essa porção representa as ondas que percorreram longos trajetos no meio, devido a múltiplas dispersões ou espalhamentos, caracterizando-se como a parte final das correlações cruzadas.

Essa prática é adotada por duas razões fundamentais. Primeiramente, a parte coda do sinal da fonte virtual demonstra ser mais resistente a alterações nas fontes de ruído sísmico em comparação com a chegada direta. Assim, desconsiderar a chegada direta minimiza qualquer viés introduzido pelas variações nas fontes de ruído sísmico. Em segundo lugar, as ondas multiplamente espalhadas proporcionam uma amostragem mais extensa do meio ao longo do tempo, tornando pequenas variações na velocidade evidentes na coda, mesmo quando nenhuma mudança é perceptível nas chegadas diretas. As alterações registradas na onda coda, em sua maioria, refletem mudanças na velocidade da onda de cisalhamento (Wit & Olivier, 2018).

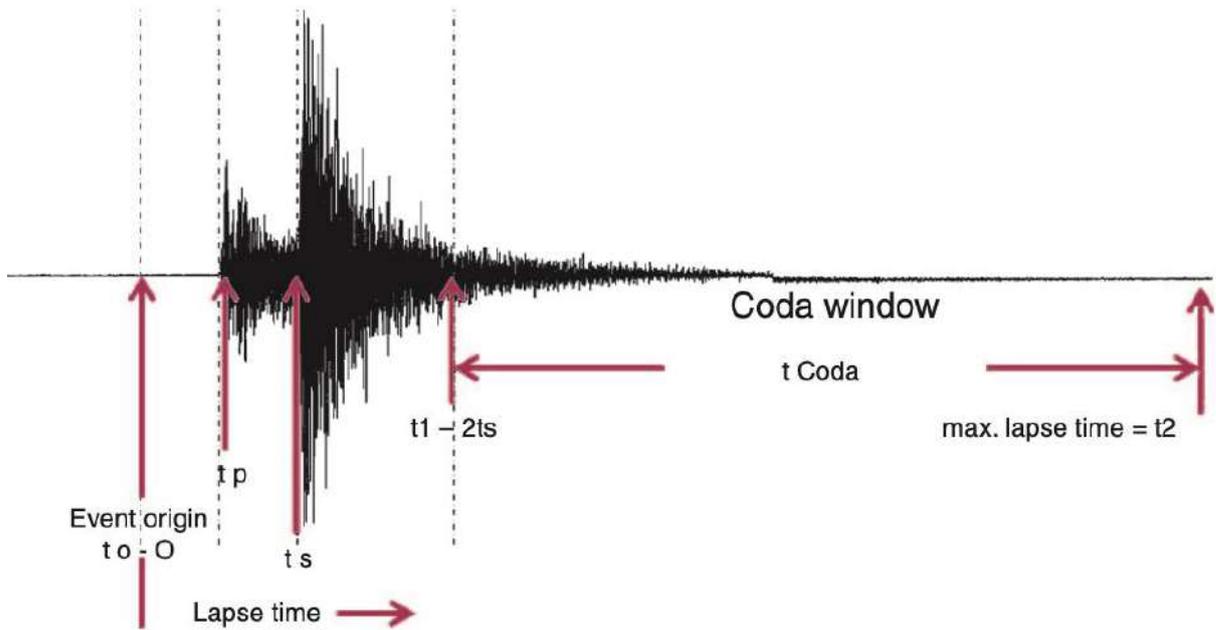


Figura 16: Sismograma mostrando os tempos de origem e chegada das ondas P e S e a região tardia chamada de coda wave (KIM et al., 2017).

Portanto, as alterações de velocidade aferidas na onda Coda são predominantemente relacionadas a variações de velocidade das ondas S (Wit and Olivier, 2018). Com isso, as ondas S representam ondas de corpo associadas ao estímulo de cisalhamento do meio de propagação, seguindo a lei física expressa na equação a seguir, conforme Rosa Filho, 2002. Onde V_s é a velocidade de propagação de ondas S no meio; μ é o módulo de cisalhamento; ρ é a massa específica; E é o módulo de elasticidade; e σ é o coeficiente de Poisson.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}}$$

O monitoramento de ruído sísmico ambiente dá acesso direto a mudanças de velocidade relativa de um meio (subsuperfície), que se dá principalmente devido à mudança de velocidade relativa para a onda de cisalhamento. A fonte dessa mudança de velocidade relativa pode, portanto, ser uma mudança de densidade ou de rigidez (LAROSE, 2015). A associação da variação de velocidade com a rigidez do meio pode ser definida pela seguinte equação.

$$G_0 = \rho \times V_s^2$$

G_0 : Rigidez do meio,

ρ : Massa específica,

V_s : Velocidade de propagação de ondas S no meio.

Com isso, o sistema de monitoramento microssísmico implementado na Barragem BR de Catalão adquire dados relacionados a ambas as abordagens: a microssísmica convencional e a interferometria sísmica do ruído ambiente. No âmbito deste trabalho, a análise será feita exclusivamente dos dados obtidos por meio da abordagem de interferometria sísmica do ruído ambiente.

Conforme o padrão de instalação, os equipamentos devem atender às seguintes atribuições:

- Permitir o monitoramento em tempo real das vibrações e variação de velocidade no maciço das barragens, através da análise contínua da sua integridade.
- Monitorar em tempo real qualquer fator externo que possa interferir no maciço da barragem, seja relacionado às atividades de mineração ou a sismos naturais ou induzidos.
- Ampliar o nível de informações fornecidas por outros sistemas de instrumentação e monitoramento, como INA's e piezômetros.

6.2.4. Aquisição dos dados da Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente na Barragem BR

Após finalizada sua instalação, em maio de 2021, o sistema conta, ao todo, com 8 (oito) geofones, sendo 6 (seis) sensores uniaxiais (SMGU) e 2 (dois) sensores triaxiais (SMGT), dispostos ao longo da crista e no pé da estrutura, conectados a 3 (três) estações sísmicas alimentadas por energia solar (Figura 17).

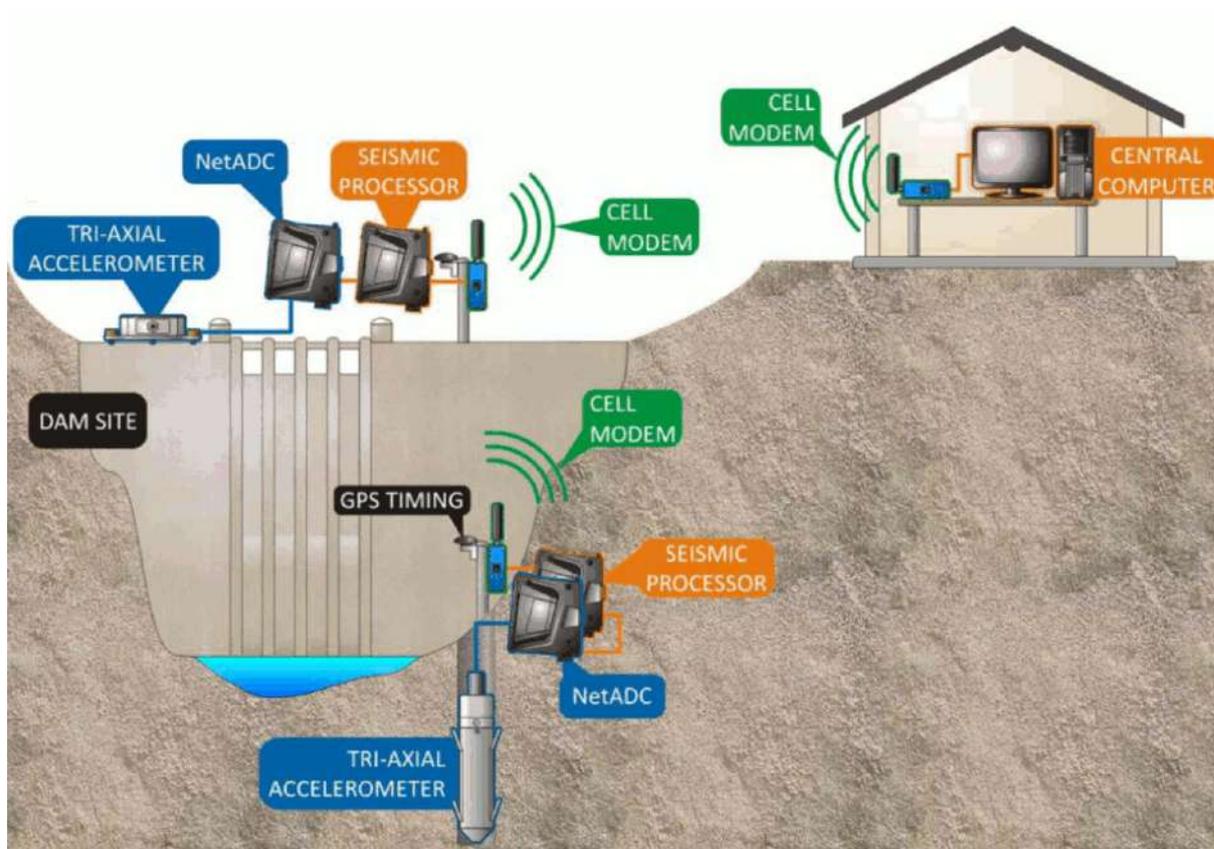


Figura 17: Arquitetura de instalação de sensores em barragens (Fonte: Institute of Mine Seismology).

Para a implantação do sistema microssísmico na barragem, foram seguidas as seguintes diretrizes de instalação.

- O preenchimento dos furos para instalação dos sensores foi feito com o próprio material retirado da escavação dos furos;
- Os sensores foram instalados de forma vertical com a marca “N” apontada para o Norte. É de fundamental importância orientar o sensor em relação ao Norte;
- O cabeamento foi todo passado através de conduítes, para aumentar a proteção aos cabos.

Os sensores foram conectados via cabo ao conversor analógico-digital e pré-processador sísmico, sendo necessária a abertura de valas na barragem.

A arranjo microssismo instalado em Catalão é composto por 8 geofones localizados na crista e pés da barragem, 6 uniaxiais de 4,5 Hz e 2 triaxiais de 14 Hz e a barragem possui 4 geofones, formando banco de dados sísmico integrado.

6.3. MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves)

Os métodos sísmicos geralmente utilizam a onda P (compressional, longitudinal ou primária) devido à sua facilidade de geração e identificação em sismogramas. Porém,

atualmente, há uma crescente utilização da onda S (cisalhante, transversal ou secundária) em projetos de geotecnia, especialmente na área de fundações. Isso ocorre porque a velocidade de propagação da onda S não é afetada pela presença de água no maciço, diferentemente da onda P. A onda S se propaga somente na porção sólida do solo, tornando-a mais eficaz na identificação de mudanças litológicas em comparação com a onda P.

O método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) é fundamentado na dispersão das ondas Rayleigh quando se propagam através de um meio verticalmente heterogêneo e estratificado. Nesse contexto, diferentes comprimentos de onda atravessam diferentes pacotes de camadas em subsuperfície, sendo cada comprimento de onda influenciado pelas propriedades elásticas do material que, por sua vez, determinam sua velocidade de propagação.

Park et al. (1999) propuseram o método MASW com o objetivo de estimar perfis de variação da velocidade da onda S (V_s) em profundidade, a partir do registro sísmico multicanal chamado *ground roll*. Em levantamentos sísmicos terrestres, quando se utiliza uma fonte de onda de compressão, uma parcela significativa da energia sísmica total é composta pelas ondas Rayleigh. Com o *ground roll* sendo um tipo específico de onda Rayleigh que viaja ao longo ou próximo à superfície do solo, caracterizada geralmente por sua velocidade relativamente pequena, frequência baixa e alta amplitude.

Conforme destacado por Park et al. (1999), a execução do ensaio MASW apresenta semelhanças com o ensaio de sísmica de refração. No processamento empregam-se técnicas de inversão de dados que culminam na obtenção de informações pontuais da variação de V_s em relação à profundidade, gerando assim um perfil 1D. Por meio da realização de múltiplos ensaios ao longo de uma determinada linha, torna-se possível gerar uma seção que representa a distribuição espacial de V_s (2D). Essa informação é de extrema relevância, especialmente no contexto da geotecnia.

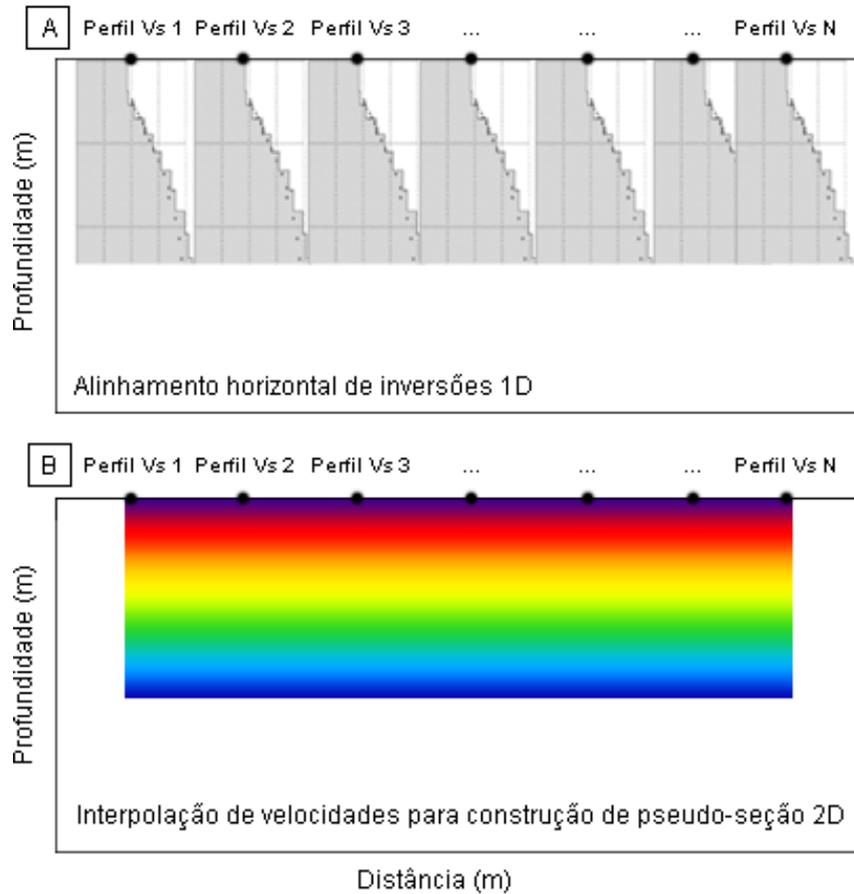


Figura 18: Etapas para construção de uma pseudo-seção 2D de Vs com o método MASW. A) alinhamento horizontal de modelos 1D; B) interpolação de dados.

Cada perfil de Vs obtido é representativo da porção central do arranjo de geofones. No processo de construção das seções 2D é crucial levar em consideração os efeitos de interpolação. É importante notar que quanto menor for o espaçamento entre os perfis, maior será a precisão na reconstrução do modelo de velocidade. Um intervalo de 50% do comprimento do arranjo de geofones é um incremento tradicional para aquisições desse método, garantindo maior produtividade na etapa de aquisição de dados e uma resolução satisfatória para a maioria dos cenários.

Portanto, de acordo com Dourado (1984), a obtenção das velocidades da onda P (V_P) e da onda S (V_S), combinada com informações sobre a densidade dos materiais, possibilita a determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos dos maciços, tais como o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e o módulo de rigidez ou cisalhamento. Conforme ressaltado por Souza e Gandolfo (2012), a compreensão desses parâmetros desempenha um papel crucial na capacidade de prever o comportamento tensão-deformação de solos quando sujeitos a solicitações dinâmicas de baixa amplitude. Essa compreensão é especialmente relevante em

situações em que estruturas geradoras de vibração, como máquinas, motores vibratórios, aerogeradores de energia eólica, entre outras, serão instaladas sobre esses solos.

A velocidade de propagação da onda S (V_s) é função do módulo de cisalhamento (*shear modulus* – definido como a resistência do material às tensões de deformação por cisalhamento) e da densidade do material, com o módulo de cisalhamento, possuindo uma relação quadrática com V_s . Portanto, a variação de V_s é frequentemente usada como um indicador de rigidez, com menores valores de V_s associados a uma menor resistência ao cisalhamento

Assim, o método do MASW utilizado principalmente na geotecnia, uma vez que essa técnica proporciona a obtenção de parâmetros cruciais, como a velocidade das ondas S e o módulo de cisalhamento. Embora seu uso seja notório nas obras de compactação do solo, sua aplicabilidade não se restringe apenas a ambientes terrestres. O MASW pode igualmente oferecer informações valiosas acerca da rigidez dinâmica do leito marinho e dos primeiros metros abaixo deste, permitindo a identificação de diferentes tipos de sedimentos nessa camada.

Para investigar variações na saturação de água na barragem, as razões V_p/V_s foram obtidas a partir da relação entre os modelos de velocidade interpolados das ondas P e S e o coeficiente de Poisson local (σ) foi calculado a partir da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

6.3.1. Aquisição dos dados de MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves) na barragem BR

No mês de julho de 2021, foram obtidos quatro perfis de dados sísmicos na área a jusante da barragem, conforme ilustrado na Figura 19. As formas de onda foram registradas por um sismógrafo multicanal do modelo Geode (Geometrics®). O processo de registro dos dados e a configuração dos parâmetros de aquisição foram conduzidos por meio de um computador externo equipado com o software Seismodule Controller (Geometrics®). Para cada seção sísmica, o comprimento dos registros foi estabelecido em 1 segundo, com uma taxa de amostragem de 4 kHz, o que equivale a uma amostra a cada 0,25 milissegundos, resultando em um total de 4.000 amostras por traço.

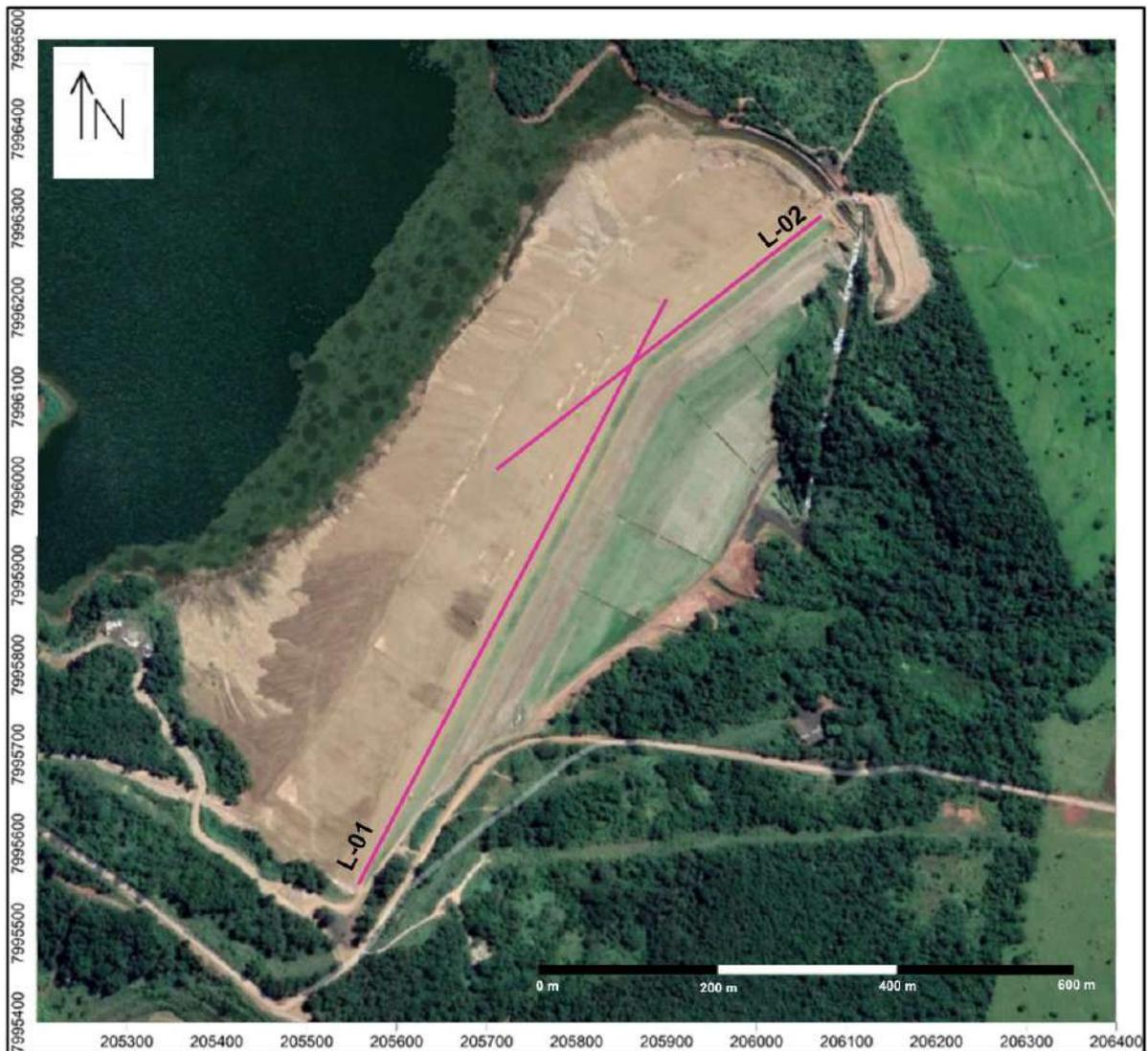


Figura 19: Mapa de localização da área de pesquisa exibindo a distribuição dos quatro perfis de aquisição do método MASW. Os números atribuídos às linhas indicam o ponto de partida de cada perfil de aquisição de dados (Fonte: Google Earth).

Cada aquisição empregou um conjunto de 24 geofones verticais com uma frequência de 4,5 Hz e um espaçamento de 5 metros entre eles. A fonte de energia sísmica consistiu em golpes provocados por uma haste de impacto contra uma placa de ferro. É importante observar que os impactos foram sempre realizados a uma distância mínima de 5 metros do local de registro, conforme visto na Figura 20. Para melhorar a relação sinal-ruído dos registros, os impactos foram repetidos sete vezes, e a seção sísmica resultante para cada posição da fonte foi obtida mediante o empilhamento automático (soma) dos registros individuais.

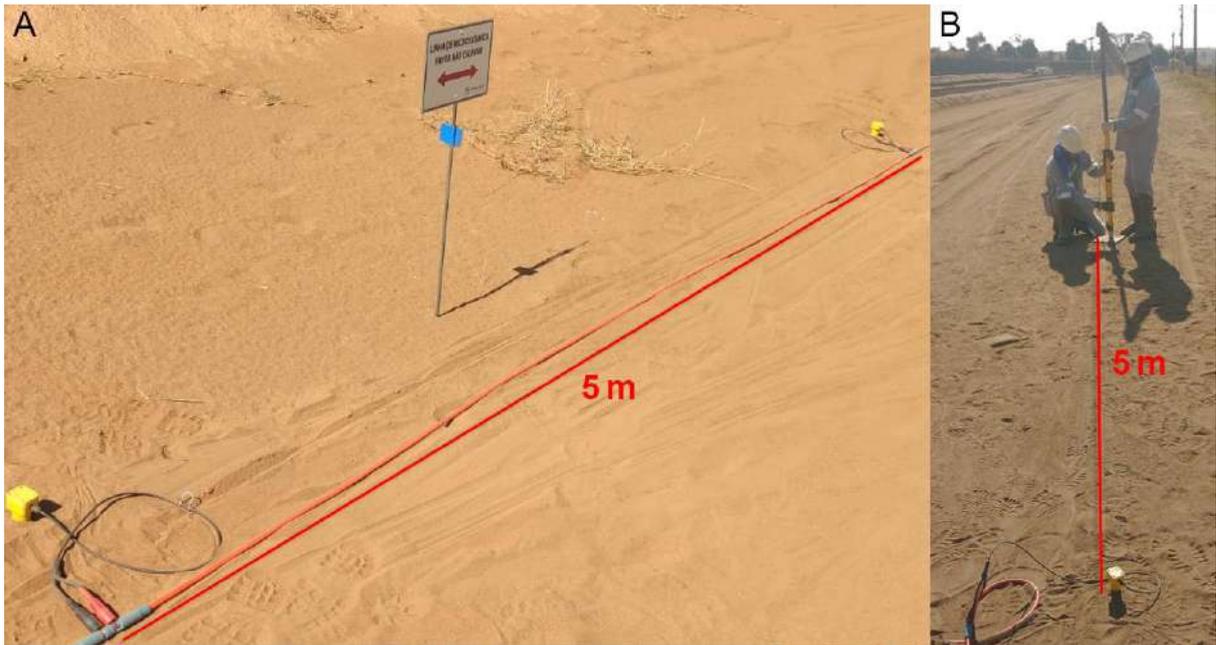


Figura 20: Fotos de procedimentos de aquisição de dados sísmicos. A) linha de geofones posicionados a cada 5 m; B) posição de tiro com off-set mínimo de 5m (distância entre fonte e primeiro geofone da linha).

A fim de visualizar os resultados em um formato tridimensional, os dados já processados de MASW foram exportados para o software LeapfrogGeo. Onde esses dados foram modelados a partir do método de modelagem implícita extraíndo pontos de contatos e gerando os sólidos possibilitando assim as interpolações 2D.

7. RESULTADOS

7.1. Eletrorresistividade

Nas seções elétricas (L01 – L23), a partir de uma análise visual das medidas obtidas, foi possível considerar a distinção dos perfis com base na magnitude em Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR), com valores inferiores a aproximadamente 64 ohm.m, Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR, associadas a valores entre 64 ohm.m e 357ohm.m e Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR), apresentando valores superiores a 357 ohm.m. A Figura 21 ilustra a escala de resistividade normalizada adotada nas análises geofísicas.

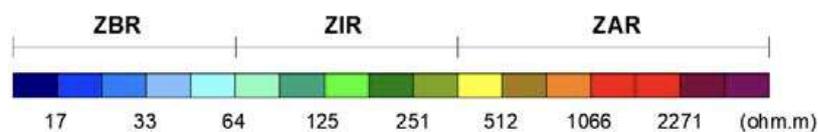


Figura 21: Escala utilizada na confecção do modelo 3D de Eletrorresistividade. ZBR - Zonas de Baixa Resistividade aparente; ZIR - Zonas de Resistividade aparente Intermediárias; ZAR - Zonas de Alta Resistividade aparente.

A partir dos dados já processados no software Res2DInv, houve a geração de um arquivo csv. contendo os valores das coordenadas (X, Y e Z) e resistividade para cada ponto de medida adquirido durante o levantamento. Com esse arquivo, foi possível importar os dados elétricos no *software Leapfrog Geo*, gerando um modelo tridimensional de eletrorresistividade para a Barragem BR de Catalão.

Uma vez gerados esses modelos tridimensionais, foi possível integrá-los com a topografia da barragem (Figura 22).

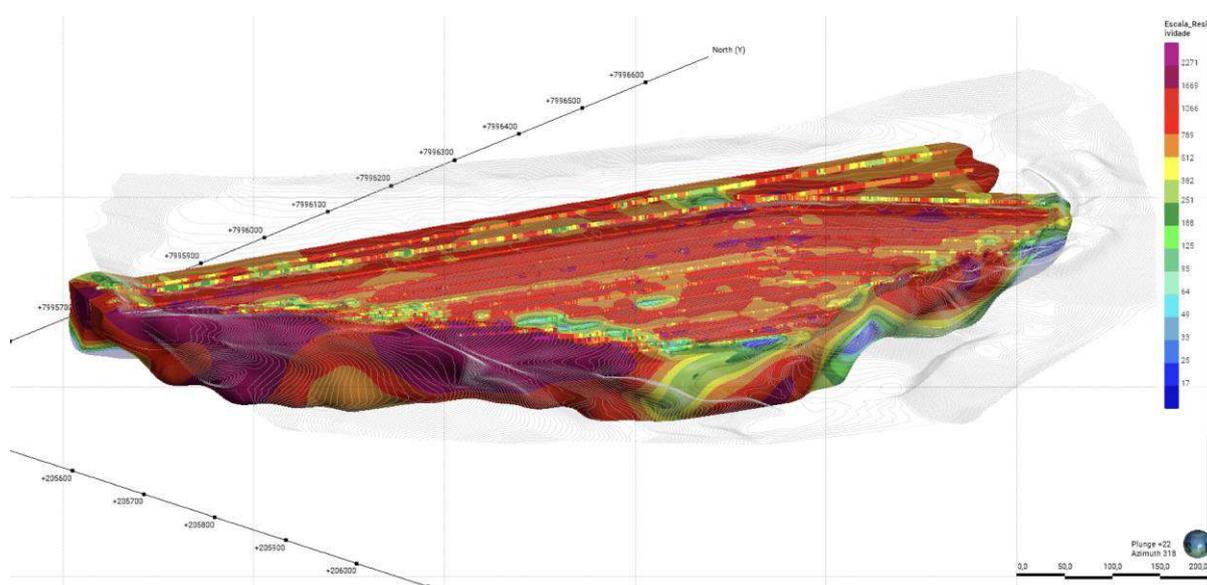


Figura 22: Modelo tridimensional (3D) de eletrorresistividade da Barragem BR de Catalão

Além disso, com o uso da ferramenta “*slice*” de separação de sólidos em relação ao valor numérico deles no software, foi feita uma análise das zonas de baixa, intermediária e alta resistividade separadamente ao longo do maciço. As Figura 23, Figura 24, Figura 25 mostram a compartimentação dessas zonas.

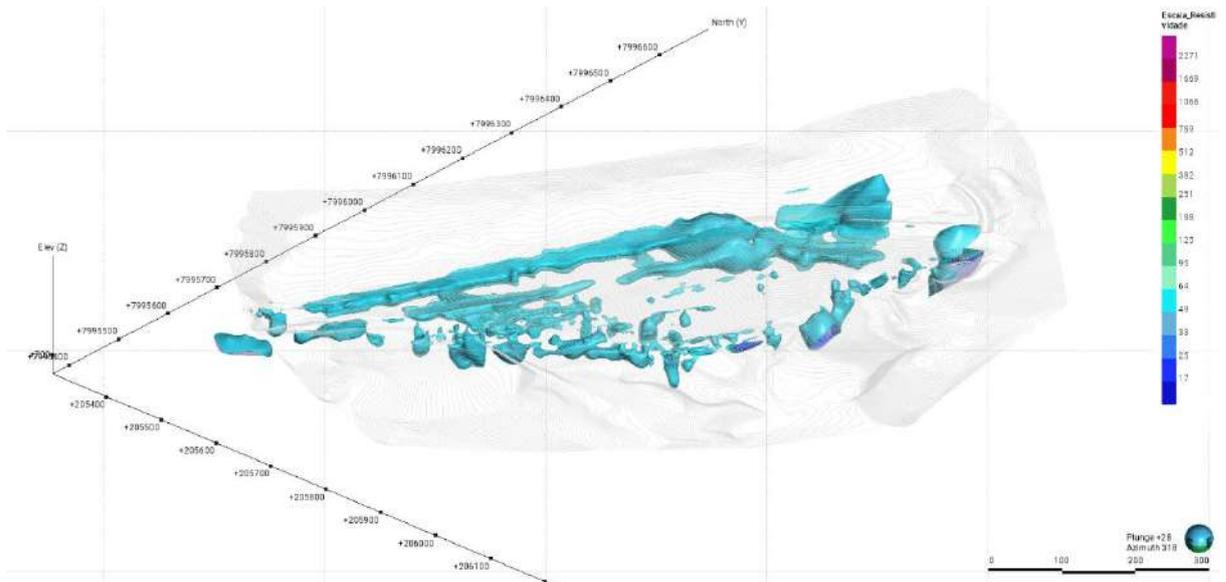


Figura 23: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Baixa Resistividade (ZBR) da Barragem BR de Catalão

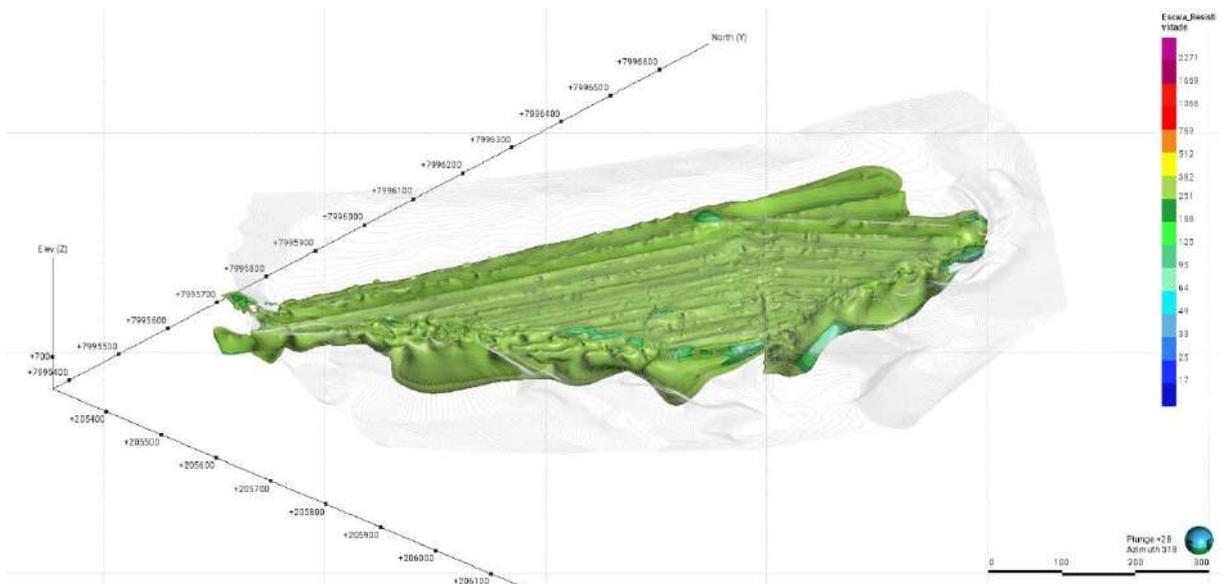


Figura 24: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Resistividade Intermediária (ZIR) da Barragem BR de Catalão.

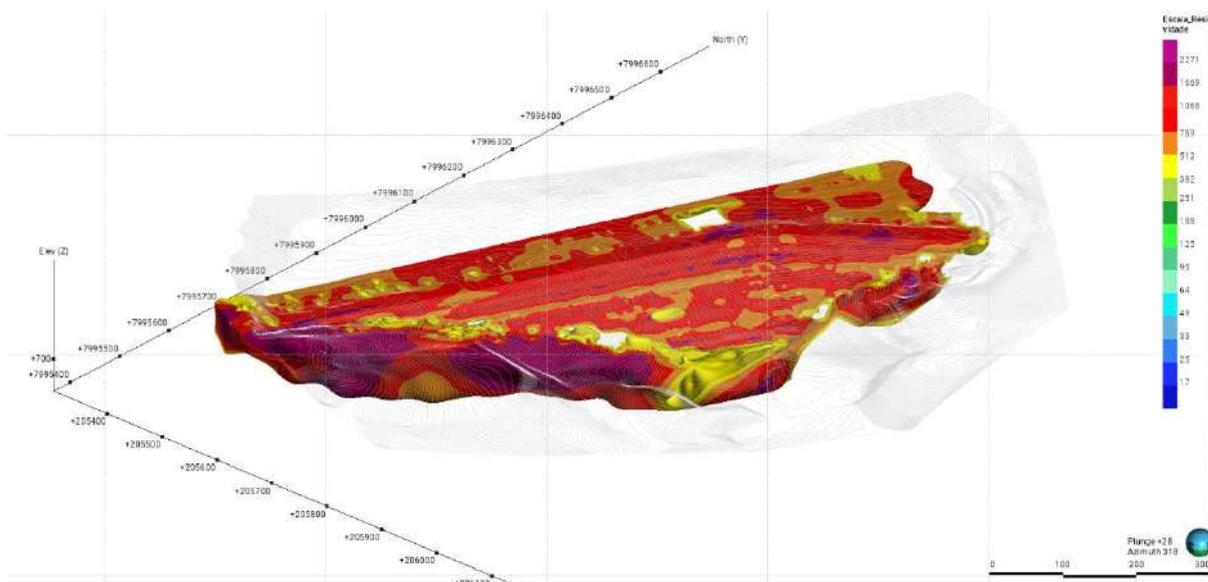


Figura 25: Modelo tridimensional (3D) das Zonas de Alta Resistividade (ZAR) da Barragem BR de Catalão.

Foram realizados cortes a partir do modelo 3D para a obtenção das seções de eletrorresistividade. Devido às heterogeneidades das respostas geofísicas nas seções, estas foram agrupadas em três categorias distintas, conforme a região de aquisição dos dados, para facilitar suas descrições. Cada grupo abrange um conjunto de seções com características geofísicas e contextos semelhantes, definidos como:

7.1.1. Grupo 01 - Seções Adquiridas na região da praia

Composto pelas seções L-01 e L-02 localizadas na área da praia de rejeitos do barramento (Figura 26), apresentou uma assinatura geofísica subsuperficial caracterizada por altos valores de resistividade aparente (ZAR), sobrepondo níveis condutivos (ZBR) em faixas intermediárias. Em maiores profundidades, observaram-se valores intermediários de resistividade aparente, com continuidade até o limite basal das seções. As zonas de elevada resistividade em profundidade são notáveis até aproximadamente 150 m do início das seções (Figura 27A).

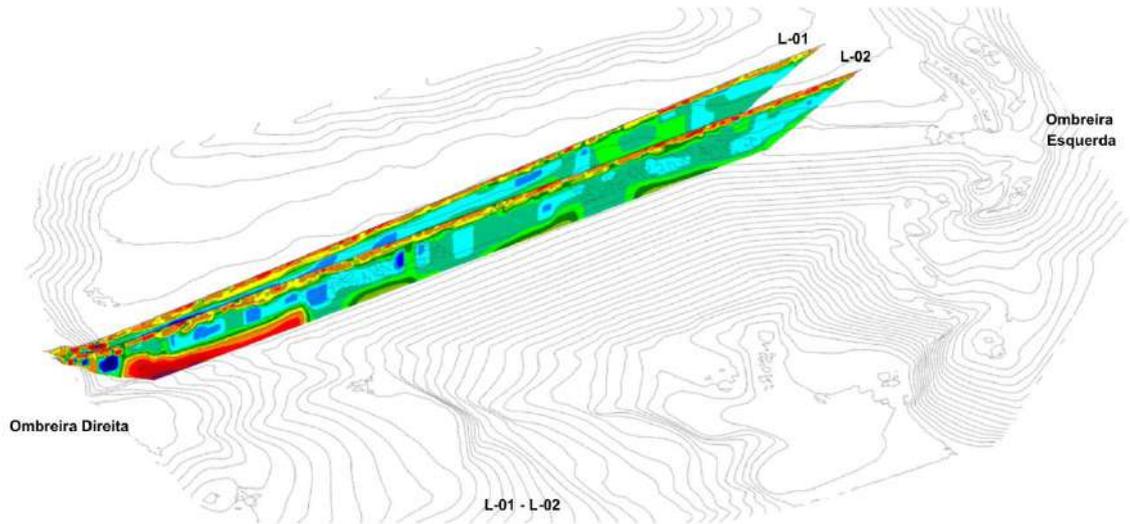


Figura 26: Seções L-01 e L-02 de eletrorresistividade adquiridas na região de praia do barramento.

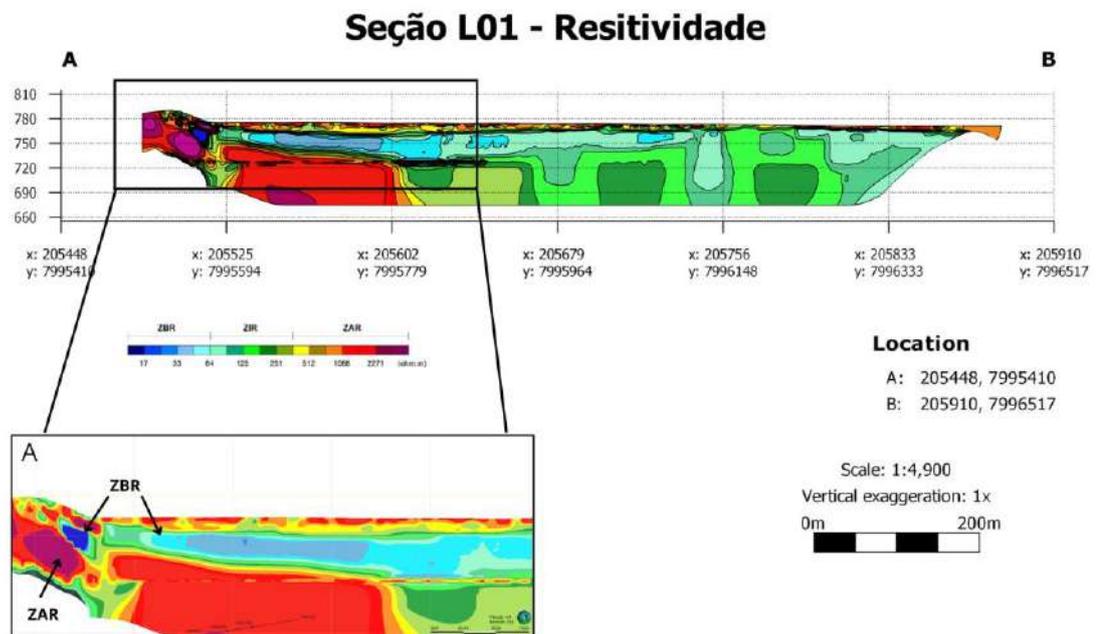


Figura 27: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 01. Em detalhe, seção L-01 de Eletrorresistividade (CE). A - Detalhes das ZBR e ZAR no início de perfil.

7.1.2. Grupo 02 - Seções Adquiridas na região do maciço

Composto pelas seções L-03 a L-15, localizadas ao longo do maciço do barramento e paralelas ao eixo principal (Figura 28). Subsuperficialmente, essas seções revelaram um horizonte definido por Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR). Abaixo deste conjunto, observa-se uma distribuição homogênea e aproximadamente contínua de Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR), que são limitadas na base por outras Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR). Em profundidade, essas regiões resistivas são evidentes nos metros iniciais de algumas seções (até 440 metros a partir do início da aquisição da L-03), como ilustrado na Figura 29.

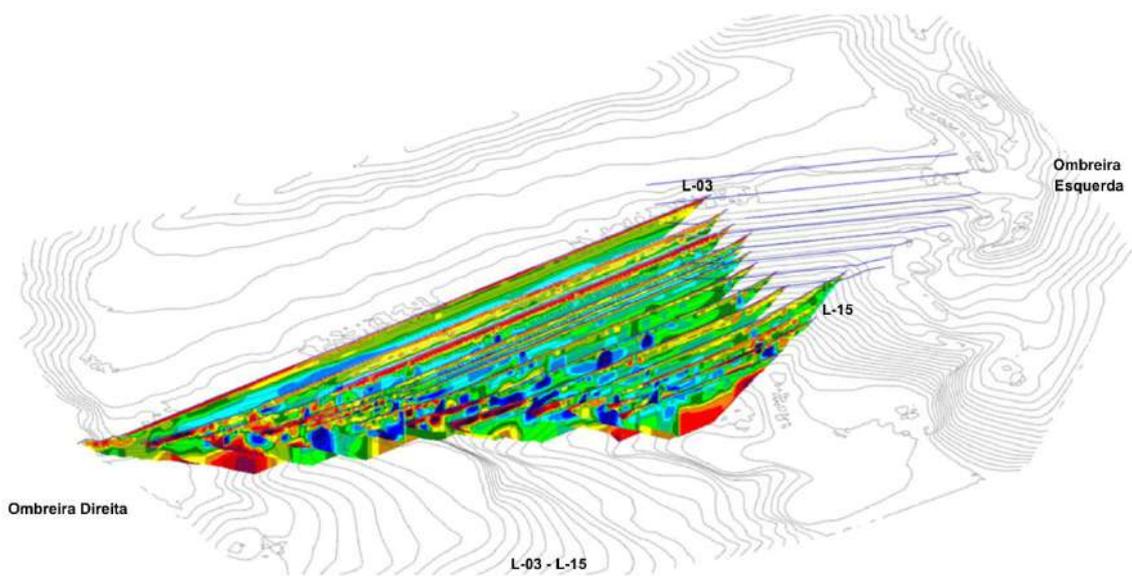


Figura 28: Seções L-03 a L-15 de eletrorresistividade adquiridas na região do maciço.

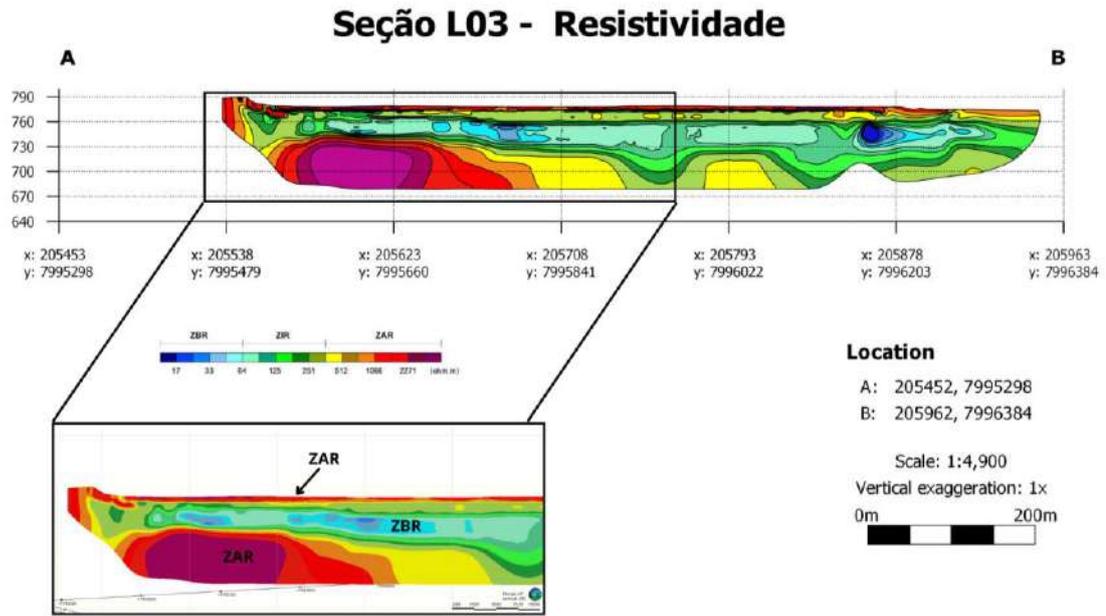


Figura 29: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-03 de Eletrorresistividade (CE).

No que diz respeito às zonas de alta resistividade na base das seções, estas geralmente se apresentam de forma descontínua nas seções L-03 a L-11. Contudo, a partir da seção L-12, essas zonas resistivas passam a ser distribuídas de maneira mais uniforme ao longo das linhas, exibindo valores mais elevados ($> 1066 \text{ ohm.m}$) em comparação com as demais seções do grupo (Figura 30).

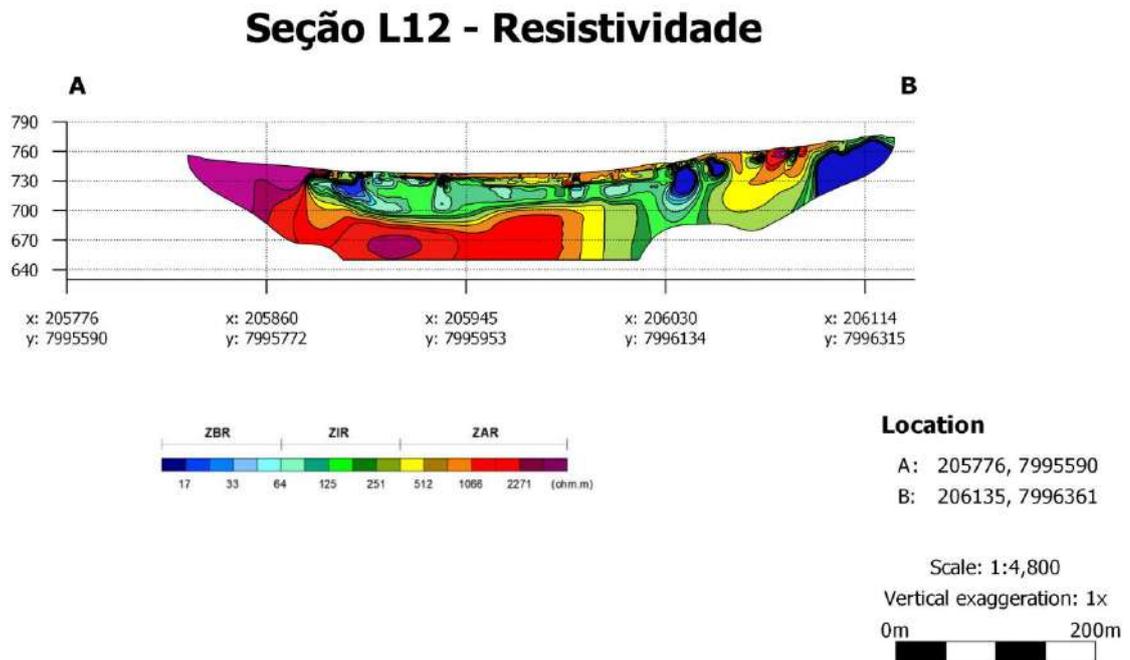


Figura 30: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-12 de Eletrorresistividade (CE).

Em diferentes seções do grupo, como mostrado nas seções L-03 e L-04, foram identificadas faixas com orientação aproximadamente subverticais e caracterizadas por valores de resistividade aparente mais baixos, sendo estas delimitadas lateralmente por zonas de maior resistividade, conforme ilustrado na Figura 31.

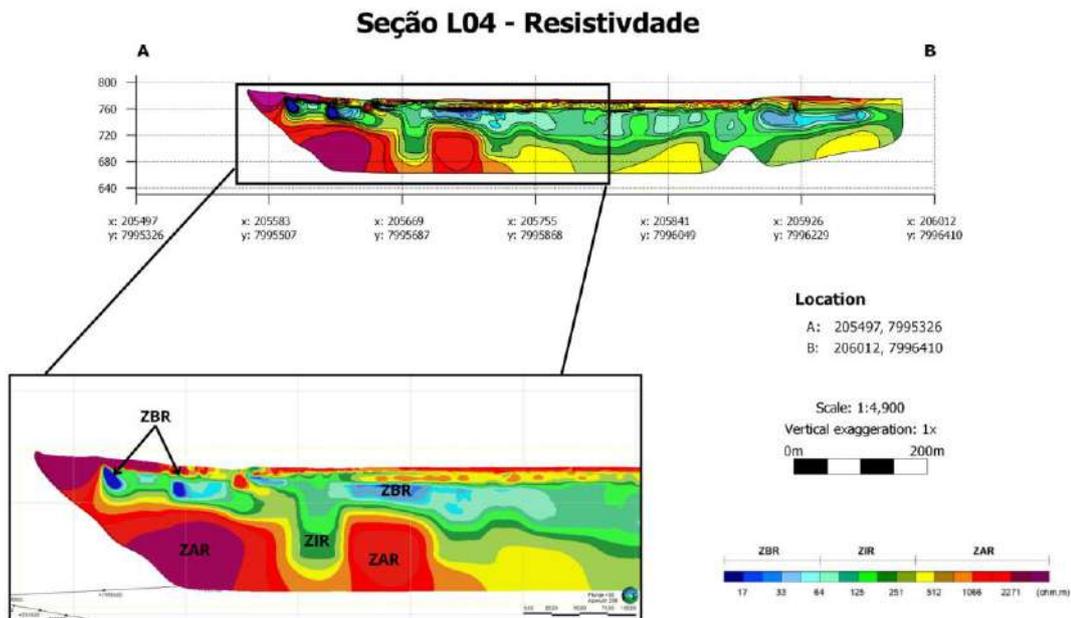


Figura 31: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Em detalhe, seção L-04 de Eletroresistividade (CE).

Em diversas seções do grupo, foram observadas anomalias condutivas de forma circular e de baixa resistividade aparente. Essas anomalias frequentemente aparecem próximas a região de inflexão para a ombreira esquerda, como pode ser visto na seção L-13 de eletroresistividade retratada na Figura 32.

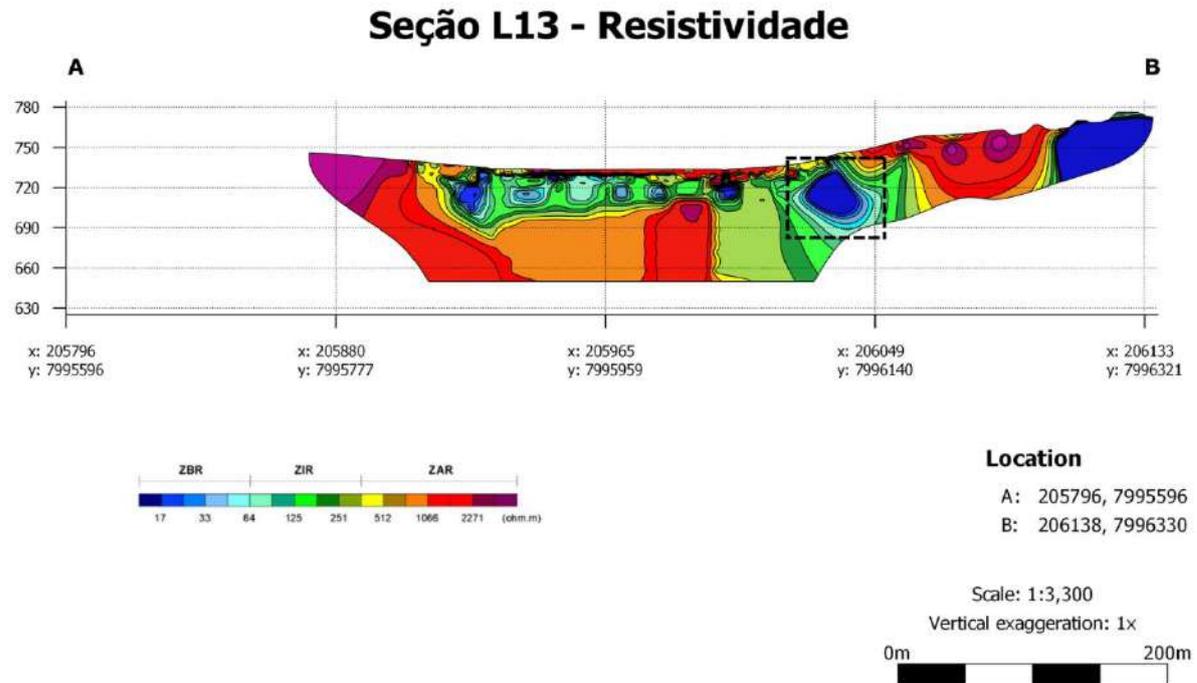


Figura 32: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 02. Seção L-13 de Eletroresistividade (CE), com destaque na zona de baixa resistividade próxima a ombreira esquerda.

7.1.3. Grupo 03 - Seções Adquiridas na região de inflexão do maciço e próximo à Ombreira Esquerda (O.E)

O grupo é composto pelas seções L-16 a L-23 e está disposto paralelamente ao eixo de inflexão do maciço do barramento (Figura 33). Essas seções são caracterizadas por zonas subsuperficiais com altos valores de resistividade aparente (ZAR) e zonas de resistividade intermediária (ZIR), ambas distribuídas de forma homogênea e contínua ao longo das linhas. Abaixo dos horizontes superficiais, há uma zona de baixa resistividade aparente (ZBR) nas porções intermediárias das seções, distribuída uniformemente e sobreposta a um nível com valores intermediários de resistividade (Figura 34).

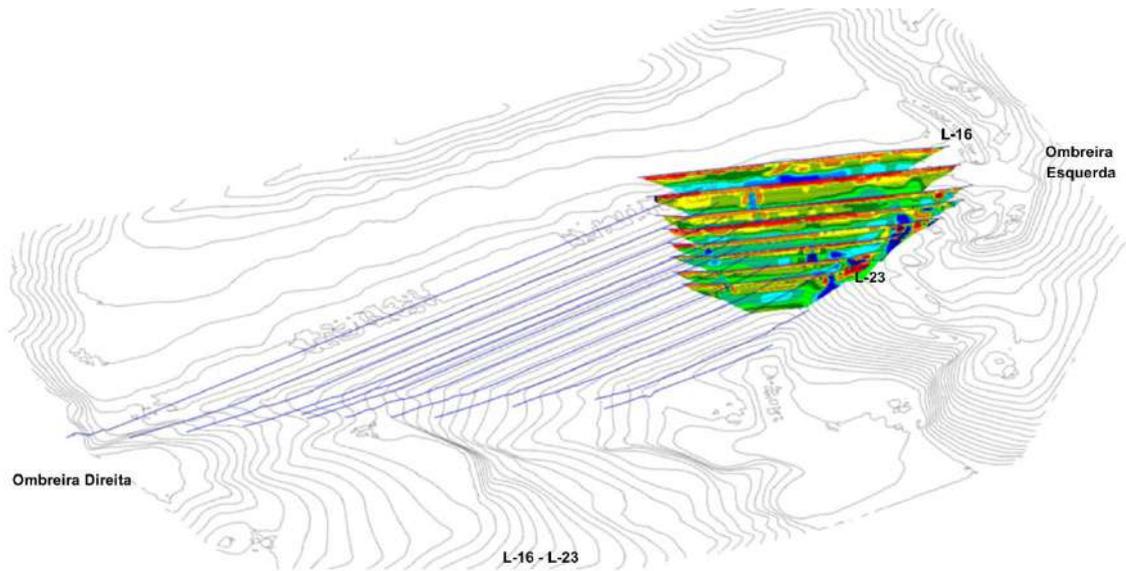


Figura 33: Seções L-16 a L-23 de eletrorresistividade adquiridas de modo paralelo ao eixo do barramento, na região de inflexão do maciço e próximo à Ombreira Esquerda (O.E).

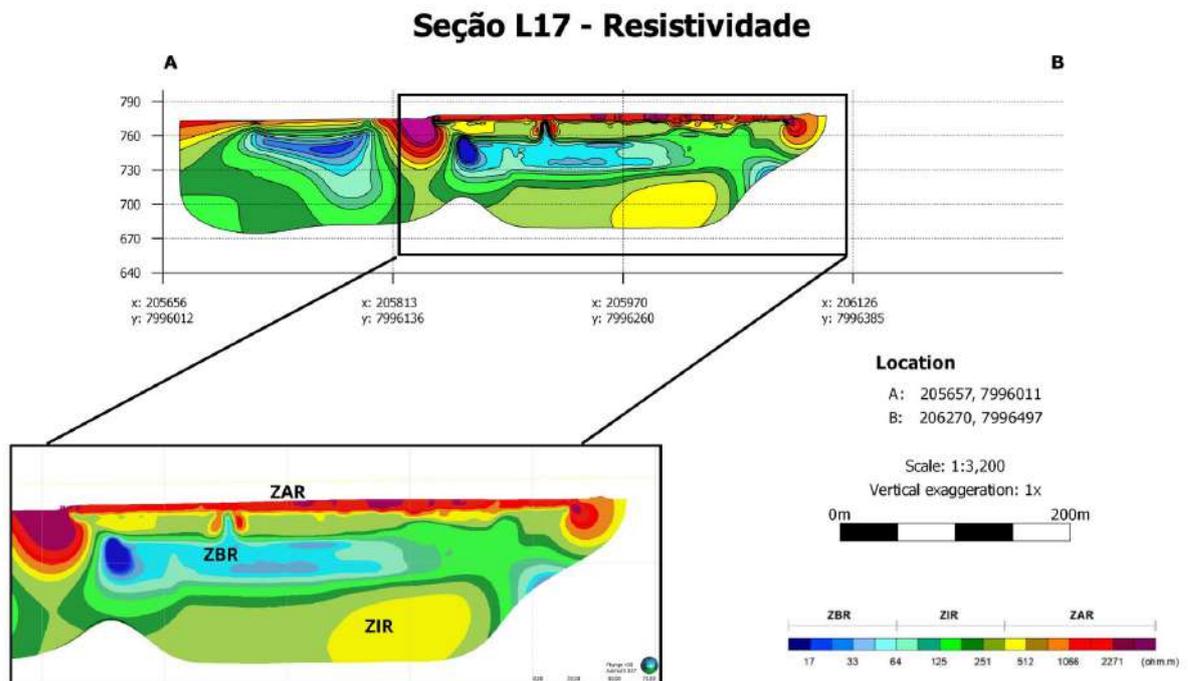


Figura 34: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 03. Em detalhe, seção L-17 de Eletrorresistividade (CE).

Em conformidade com os padrões identificados nos demais grupos, observam-se zonas anômalas de baixa resistividade, que apresentam uma morfologia circular e, em algumas ocasiões, mantêm continuidade em relação às zonas de baixa resistividade aparente localizadas

nas porções intermediárias das seções. Destaca-se que, a partir da seção L-18, essas zonas anômalas de baixa resistividade que são encontradas próximas ao final das linhas, conforme ilustrado na Figura 35 abaixo.

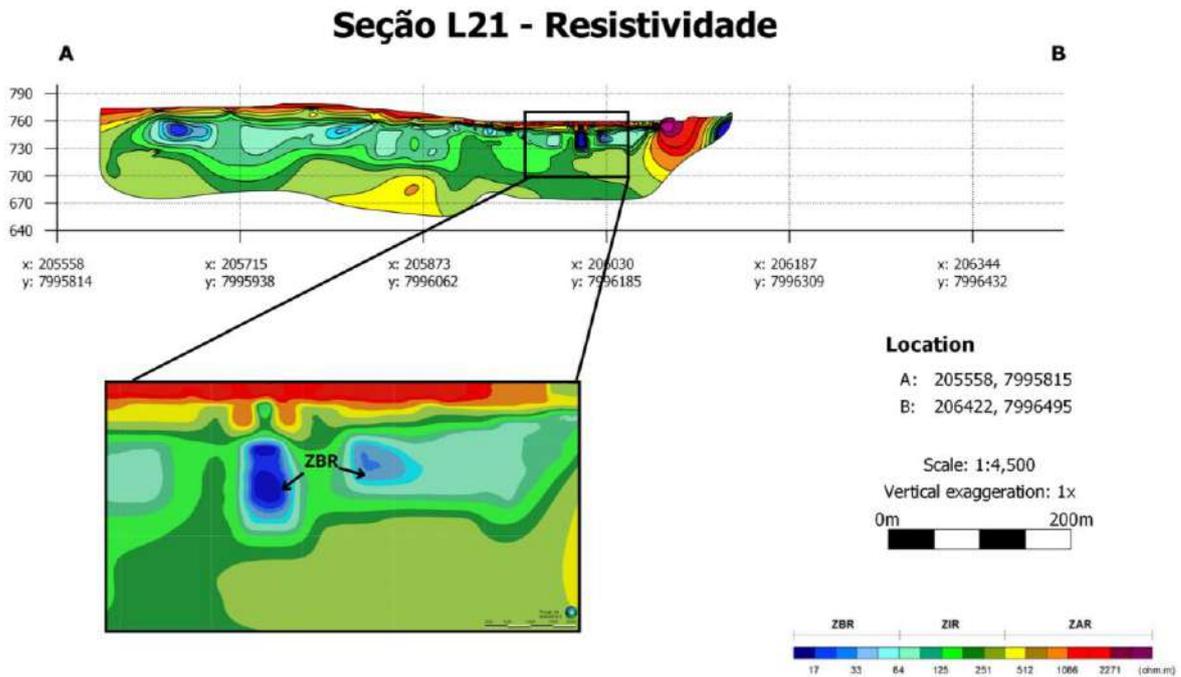


Figura 35: Caracterização de zonas geofísicas representativas do Grupo 03. Em detalhe, seção L-21 de Eletroresistividade (CE).

7.2. Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente

A análise por meio da interferometria sísmica do ruído ambiente foi iniciada em outubro de 2020 na Barragem de Catalão. Foi observada uma queda progressiva das curvas de variação de velocidade (dv/v %) obtidas pela interferometria dos seis sensores localizados na crista da barragem (Figura 36), a partir de outubro estendendo-se até julho de 2021 (Figura 37). O sensor que registrou a maior queda foi o 5, localizado na parte central do maciço, na crista, apresentando uma queda de 11%, seguido pelos sensores 2 e 6, ambos situados na ombreira direita, apresentando uma queda de 10%, e 10,5%, respectivamente.



Figura 36: Vista aérea da Barragem BR de Catalão com a estrutura de espigotamento. Onde pode ser observado o espigotamento ocorrendo na Baia 5, entre o geofone 4 e 3.

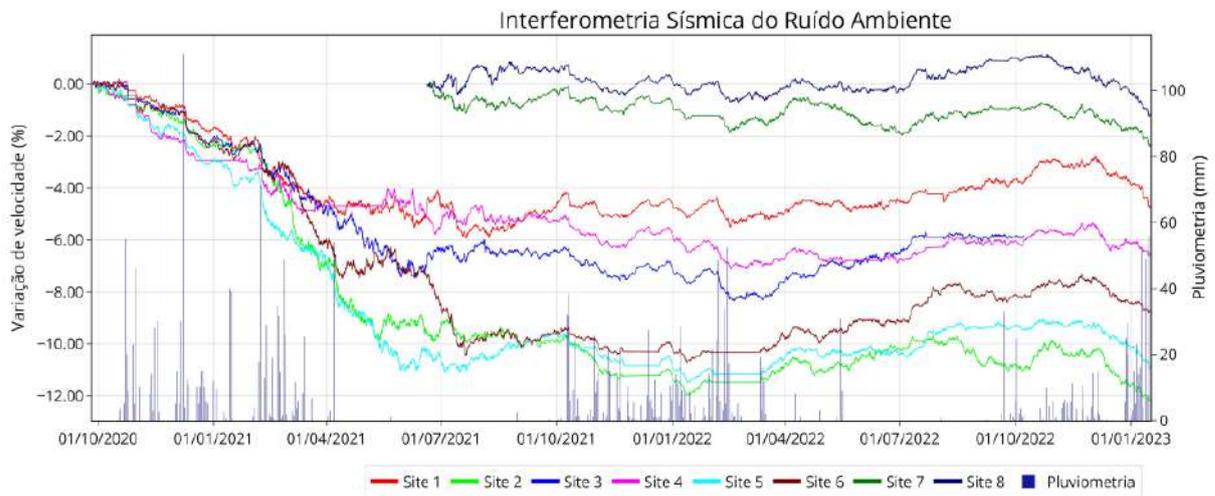


Figura 37: Histórico de mudanças de velocidade registradas por cada sensor do sistema de monitoramento, ao longo de todo o monitoramento. Os dados de pluviometria contidos no gráfico foram fornecidos pela MOSAIC.

Durante o período de outubro a abril de 2021 a região registrou um índice pluviométrico considerável de 1088 mm, e a partir do início de fevereiro, foi iniciada a disposição de rejeitos por meio de espigotamento na crista da barragem BR. O espigotamento é uma técnica de disposição de rejeitos feita ao longo de diversos pontos ao longo da crista da barragem. Nesse

método, o rejeito é depositado na região da praia, aumentando sua extensão e mantendo o rejeito afastado do maciço.

Na vista aérea da barragem (Figura 36), é possível observar a atividade de espigotamento na região de praia da estrutura. Na praia da BR de Catalão, o processo é realizado em sete baias distintas, onde o espigotamento ocorre alternadamente em cada uma dessas áreas. Na Figura 36 é possível observar o espigotamento ocorrendo na Baia 5, entre os geofones 3 e 4.



Figura 38: Vista dos espigotes na barragem.

Após o término do espigotamento em 21 de julho de 2021, a taxa de $dv/v\%$ se estabilizou e começou a apresentar um leve aumento até o início de outubro, quando ocorreu uma nova inflexão negativa, coincidindo com o início do período de chuvas na região. A partir de junho de 2021, dois novos sensores (7 e 8) foram adicionados ao monitoramento da barragem BR. Ambos foram instalados no pé da barragem, com o sensor 7 localizado próximo à ombreira esquerda e o sensor 8 próximo à ombreira direita.

Em janeiro de 2022, foi observada uma tendência de queda, seguida de um leve aumento, e novamente uma tendência de queda no início de fevereiro de 2022. De fevereiro até abril de 2022, os sensores indicaram um padrão de leve aumento da taxa de $dv/v\%$ seguido de estabilidade, período durante o qual a região experimentou uma diminuição no índice pluviométrico. Em agosto, alguns sensores mostraram uma tendência de queda. No mês de

setembro, o sensor 2 apresentou uma tendência de queda seguida por um aumento no início de outubro.

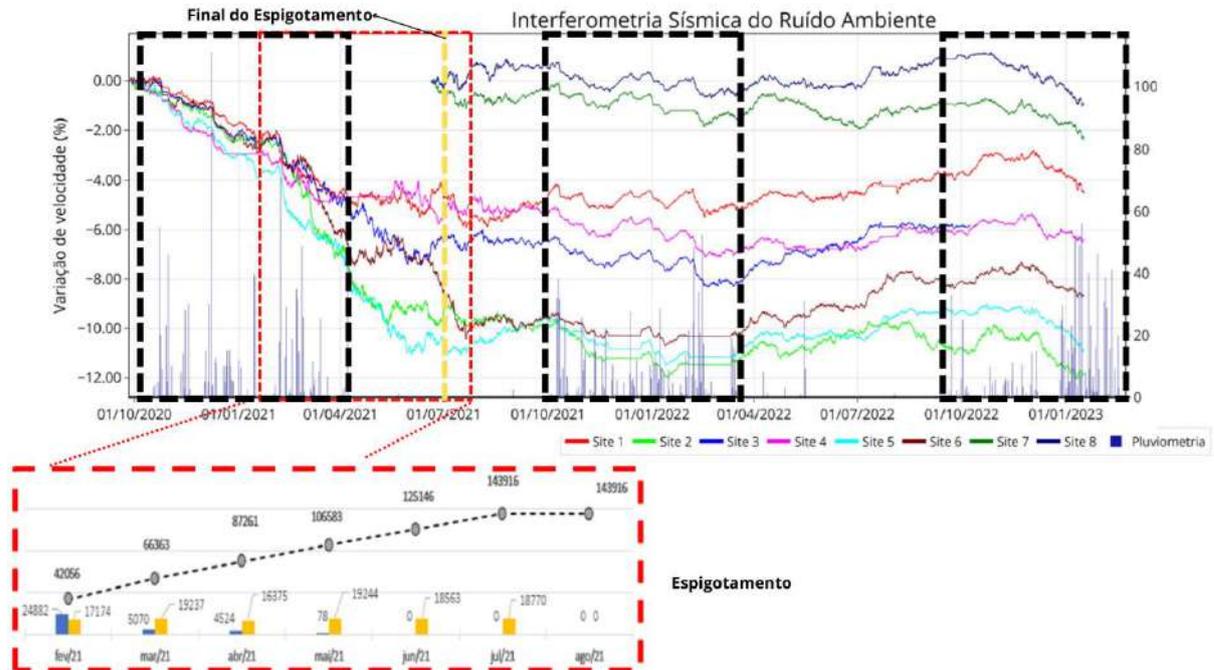


Figura 39: Histórico de mudanças de velocidade registradas por cada sensor do sistema de monitoramento, ao longo de todo o monitoramento. Caixas pretas marcam os períodos chuvosos enquanto a caixa vermelha marca o período que ocorreu espigotamento.

7.3. MASW

7.3.1. Modelos de V_s 1D

A seguir, são apresentados os modelos unidimensionais de velocidade da onda S, obtidos pela inversão das curvas de dispersão utilizando o método MASW. Para garantir a precisão na interpolação e na construção de uma seção 2D, bem como evitar distorções causadas pela falta de dados em certas áreas, os perfis foram restritos a uma profundidade máxima de 20 metros.

As Figuras a seguir exibem os perfis 1D da variação da velocidade de onda S (V_s) em profundidade, a linha L-01 apresenta valores variando entre 164 m/s e 478 m/s, enquanto a linha L-02 os valores de velocidade variam de 170 m/s a 391 m/s, da linha L-03 apresentando valores entre 53 m/s e 467 m/s. Por fim, os valores obtidos na linha L-04, variam de 153 m/s a 467 m/s.

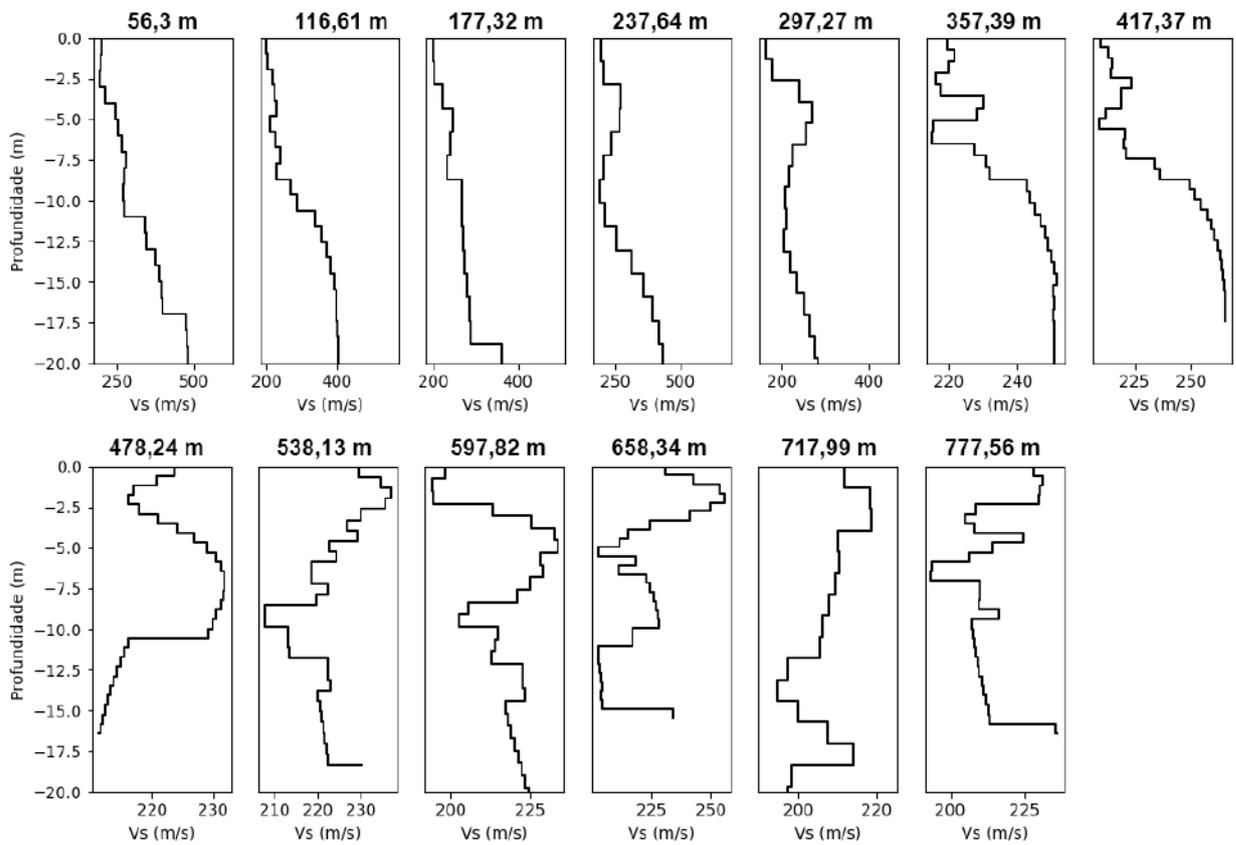


Figura 40: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-01.

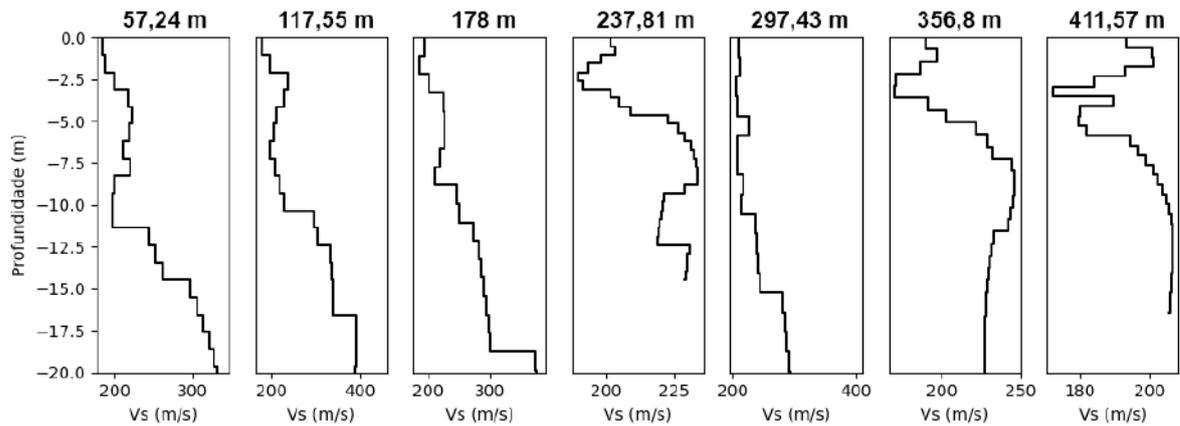


Figura 41: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-02.

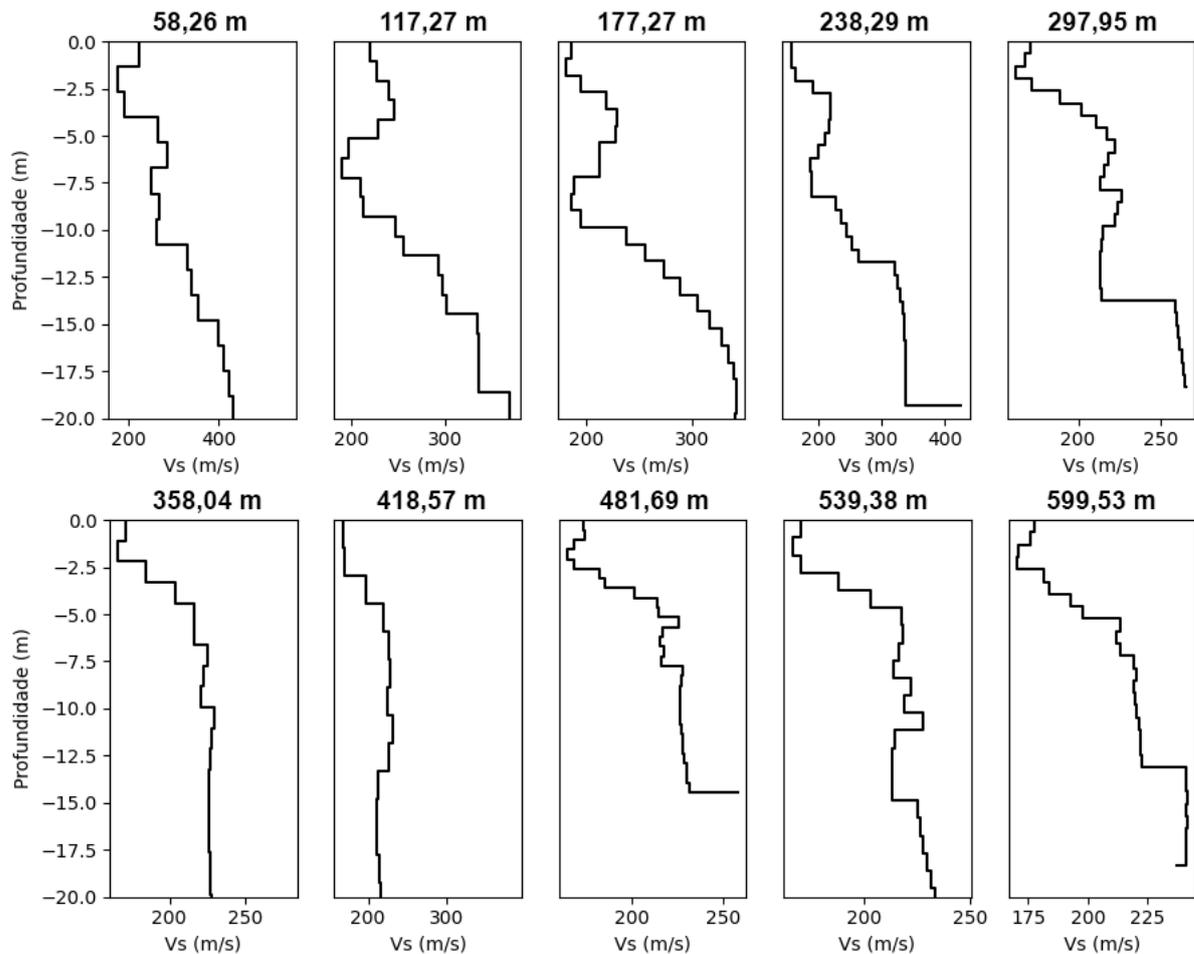


Figura 42: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-03.

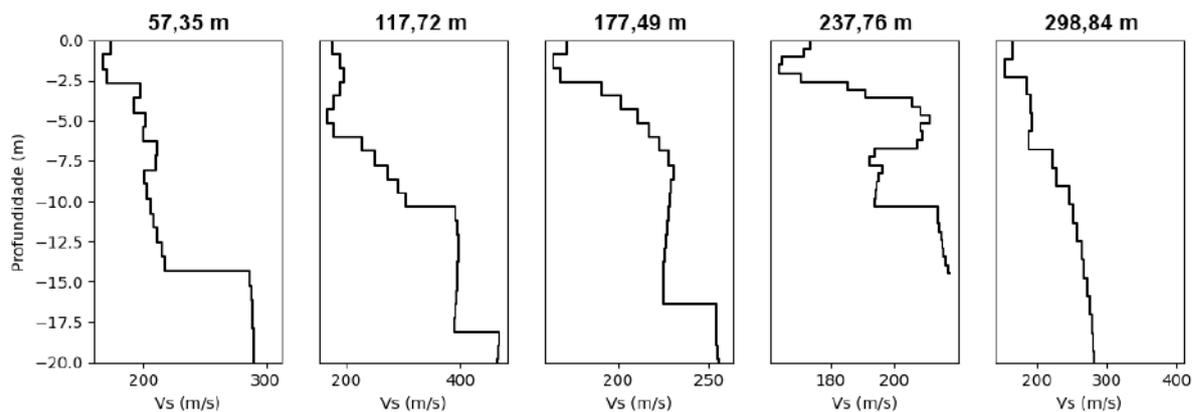


Figura 43: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-04.

7.3.1. Modelos de Vs 2D

A seguir, são apresentados os modelos bidimensionais de velocidade da onda S, gerados através da interpolação dos perfis unidimensionais de variação de Vs, mostrados nas Figuras

46 a 47. Os modelos incluem uma escala de cores (Figura 44) que representa a variação de V_s , normalizada com base nas velocidades mínima e máxima obtidas em todos os perfis. Tons mais frios indicam menores velocidades, enquanto tons mais quentes indicam maiores velocidades.

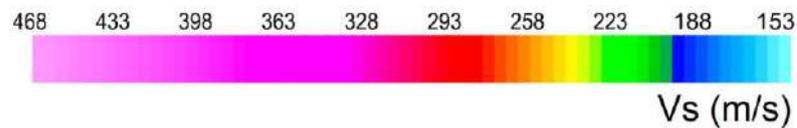


Figura 44: Escala utilizada na confecção do modelo 2D de MASW, em que valores mais claros indicam menores velocidades. (<188 m/s).

A Figura 45 ilustra a seção 2D da variação de V_s em profundidade ao longo da linha L-01. Este perfil se estende desde a Ombreira Direita da barragem (A - início do perfil) até a praia de rejeitos (B - final do perfil). As maiores velocidades são predominantes no início do perfil, provavelmente influenciado pela ombreira. A partir da metade do perfil, há uma predominância de velocidades menores, com anomalias locais de baixa velocidade (inferiores a 250 m/s) sendo observadas perto da região da praia de rejeitos, entre 730 m e 770 m de profundidade.

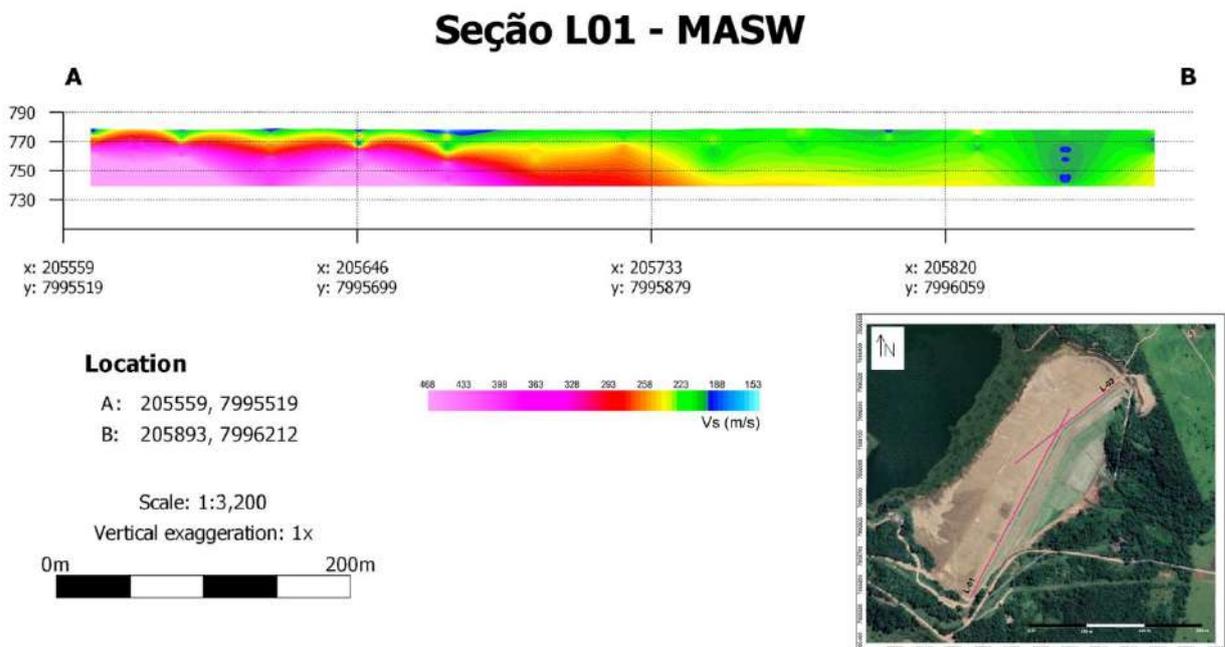


Figura 45: Seção 2D de variação de V_s em profundidade ao longo da linha L-01.

A Figura 46 mostra a seção 2D da variação de V_s em profundidade ao longo da linha L-02. Este perfil se estende desde a praia de rejeitos (A - início do perfil) até a ombreira esquerda

(B - final do perfil) da barragem. As maiores velocidades são predominantemente observadas no final do perfil, provavelmente devido à influência da ombreira esquerda. No início do perfil, há uma predominância de velocidades menores (inferiores a 250 m/s), indicando a transição para a região da praia de rejeitos. Além disso, anomalias locais de baixa velocidade são notadas perto da Ombreira Esquerda.

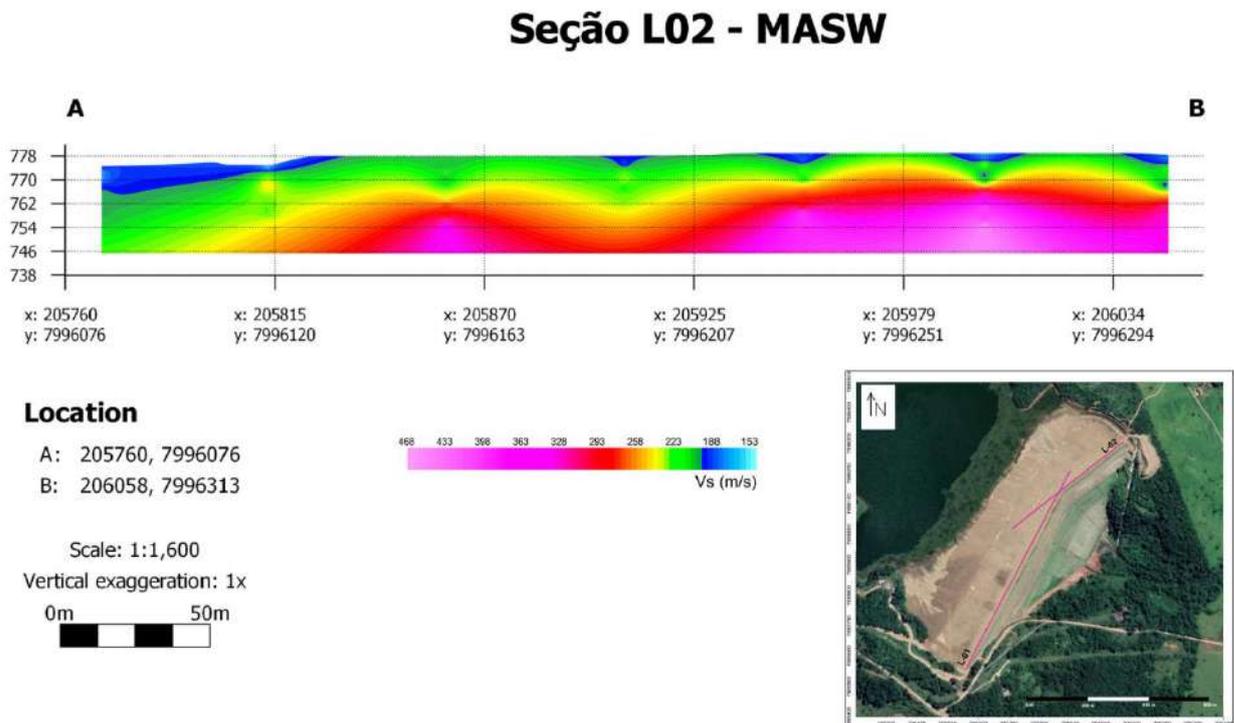


Figura 46: Seção 2D de variação de Vs em profundidade ao longo da linha L-02.

8. DISCUSSÃO

Os gráficos de variação da Vs ao longo do tempo fornecem uma visão detalhada das mudanças na velocidade das ondas S em diferentes períodos. Observa-se uma queda significativa na variação da velocidade durante os períodos de chuvas, como evidenciado entre outubro de 2020 e abril de 2021. Este padrão é consistente em todos os períodos chuvosos analisados, incluindo os anos de 2022 e 2023.

Em contraste, durante o período seco de 2021, a velocidade continuou a diminuir, comportamento atribuído ao espigotamento ocorrido de fevereiro a julho de 2021. Durante esse período, o gráfico mostra uma queda de quase 11% na taxa de velocidade (Figura 47). Esta diminuição aponta para uma redução na rigidez da barragem, sugerindo que parte do líquido espigotado estava possivelmente infiltrando na estrutura.

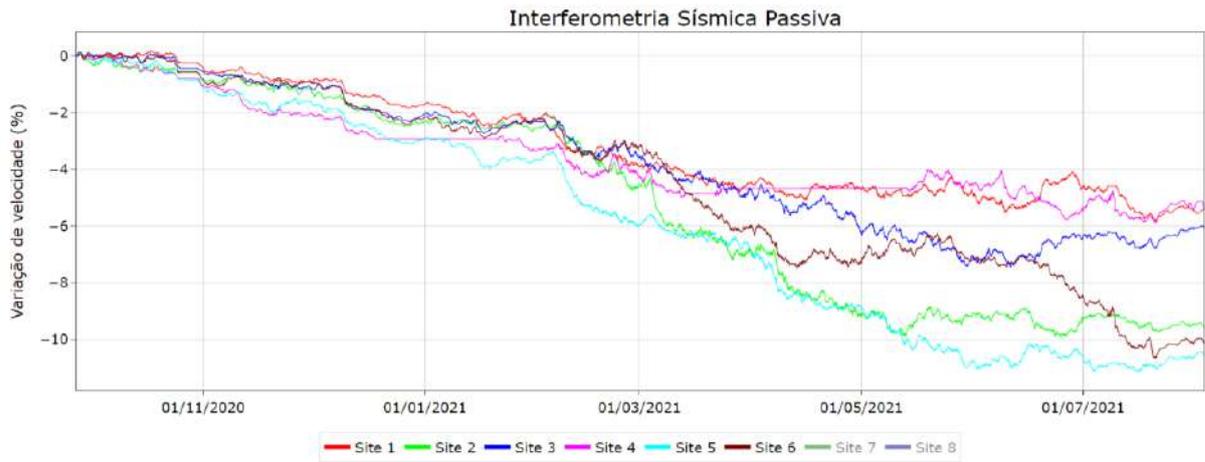


Figura 47: Variação de velocidade (%) no período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem.

A Figura 48 mostra o período e as baias específicas onde ocorreu o espigotamento na barragem, permitindo identificar uma acentuação na queda das taxas de velocidade nos geofones correspondentes às baias após o início do espigotamento. Esses dados são cruciais para correlacionar os impactos observados na variação da velocidade das ondas S, especialmente no período pós-chuvas de 2021, quando o espigotamento pode ter influenciado na rigidez da barragem.

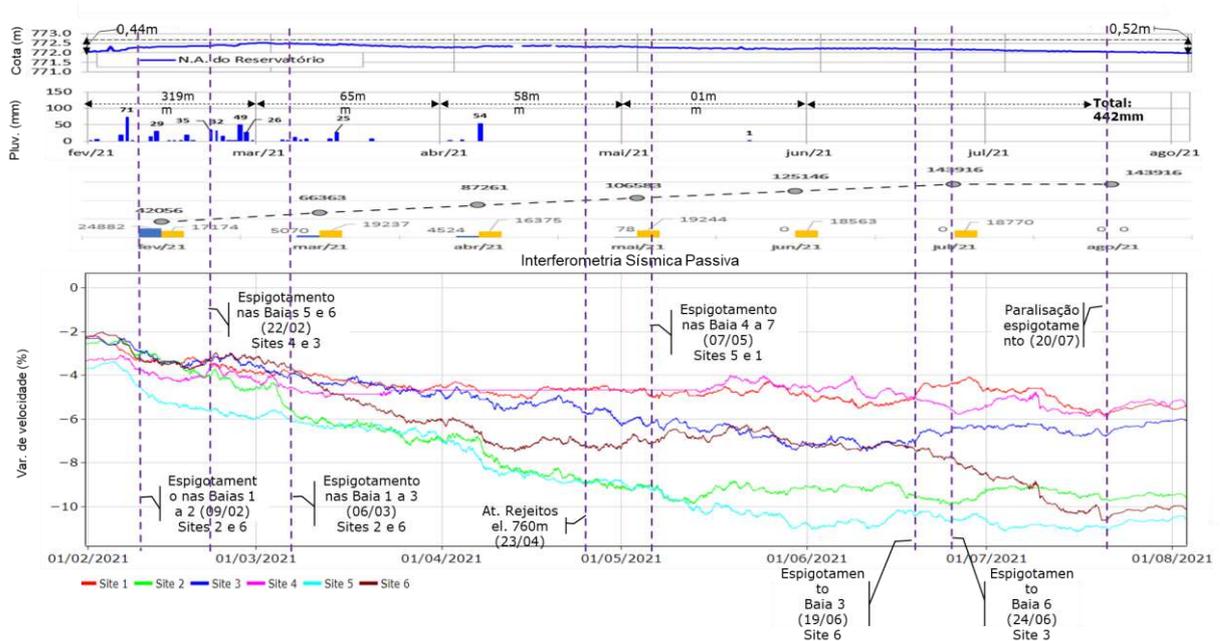


Figura 48: Variação de velocidade (%) no período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem, em conjunto com o gráfico de pluviosidade e de espigotamento.

No gráfico mensal de julho de 2021, com o final do espigotamento, marcado em vermelho na Figura 49, os dados mostram uma recuperação na velocidade das ondas S nos geofones, indicando um aumento na rigidez da barragem. Este comportamento reforça a hipótese de que o espigotamento impactou negativamente na velocidade da onda S na barragem, e sua interrupção permitiu uma recuperação parcial da rigidez do maciço.

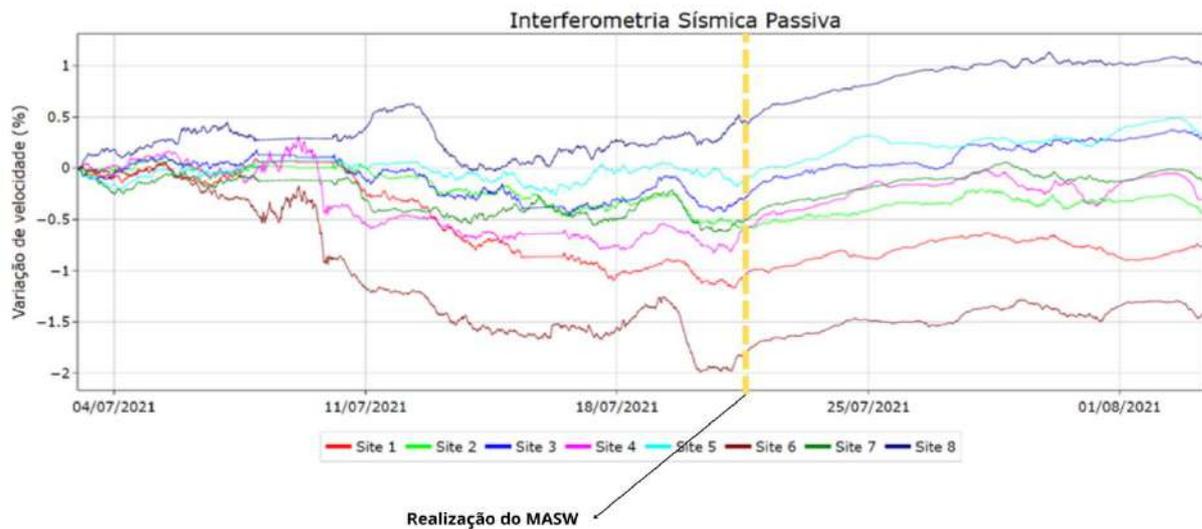


Figura 49: Variação de velocidade (%) após o período em que estava ocorrendo espigotamento na praia da barragem.

Complementarmente foi realizado um modelamento pelo *Leapfrog Geo* possibilitando a determinação da posição das feições de interesse, além de fornecer o volume associado e suas coordenadas georreferenciadas (

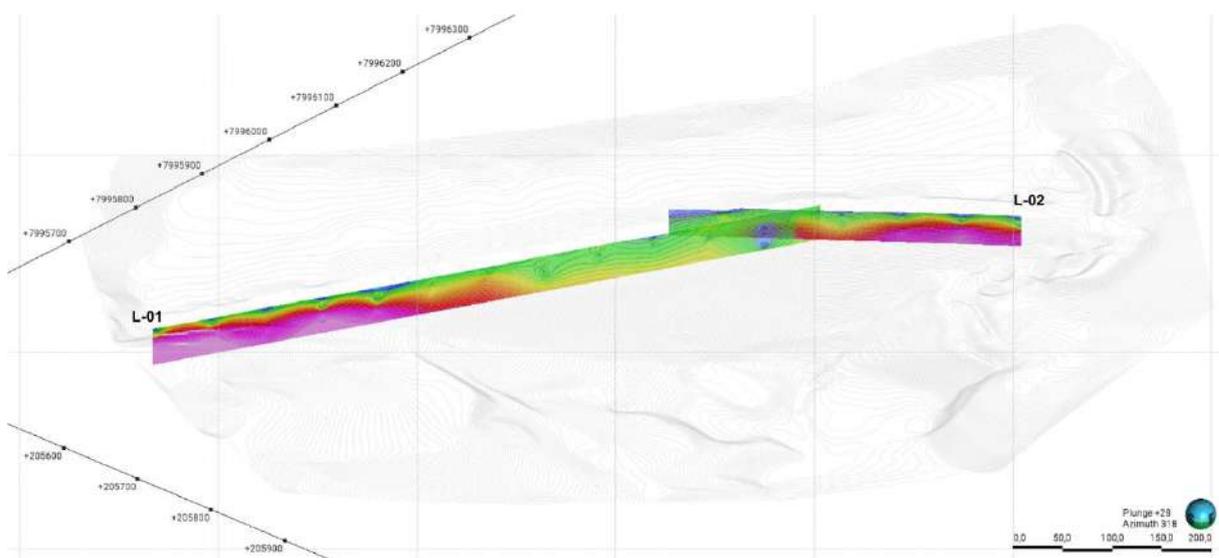


Figura 50). A análise e integração das informações obtidas a partir das diversas metodologias empregadas dependem da interpretação dos dados por geofísicos e geólogos, que qualificam e correlacionam as anomalias detectadas. Desta forma, buscou-se definir zonas de atenção na região do barramento (Figura 51) a partir do modelamento implícito de dados geofísicos de Eletroresistividade adquiridos em 2018 e MASW em 2021. Importante salientar que, de 2018 a 2021, a barragem passou por várias alterações e intervenções para a melhoria de seu desempenho; logo, ela não era mais a mesma nas duas campanhas geofísicas.

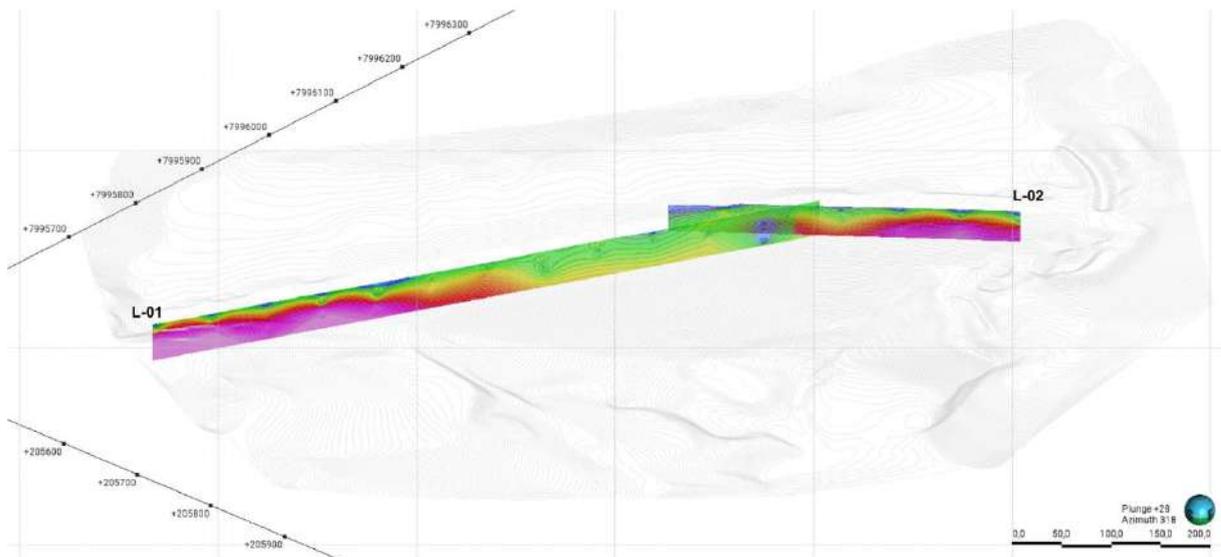


Figura 50: Interpolação dos dados das MASW realizado no *Leapfrog Geo* na Barragem de Catalão.

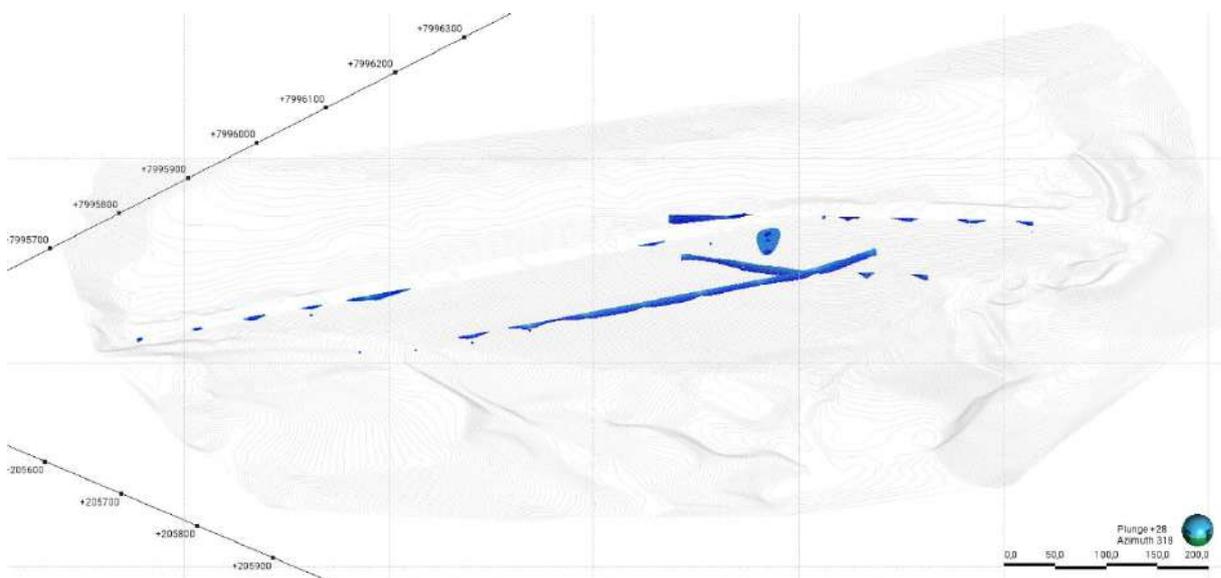


Figura 51: Regiões com V_s Baixa $< 180\text{m/s}$.

As ZAR encontradas em maiores profundidades, próximas às porções finais das linhas de Caminhamento Elétrico (CE), indicam a presença de uma fundação resistiva do barramento. As áreas com valores intermediários de resistividade aparente (ZIR), distribuídas em transições graduais, sugerem a presença de materiais com níveis mais argilosos e/ou alterados (Solo Residual/Colúvio), bem como a possível identificação de umidade.

Algumas seções apresentam anomalias de baixa resistividade (ZBR) representadas em tons de azul no modelo, estão localizadas próximas ao fim das seções, o que pode estar relacionado à influência da Ombreira Esquerda (O.E.) sobre o maciço e à estrutura extravasora e drenagem periférica. Esses fatores podem estar associados à presença de umidade, que tendem a seguir caminhos preferenciais, diminuindo os valores de resistividade aparente nesses locais.

Ao combinar as interpolações de zonas de baixa resistividade com as de baixa Vs, observa-se que as regiões com velocidades mais baixas geralmente coincidem com áreas de menor resistividade. Esses locais podem estar associados à presença de umidade do solo.

Foi realizada uma análise detalhada da geometria 3D, observando especificamente os dados na Linha 1 do MASW (Figura 52). A partir dessa análise, ficou evidente que as zonas de menor resistividade apresentam velocidades menores.

As seções apresentadas de forma conjunta, evidenciam que a região próxima à inflexão para a ombreira esquerda, onde se encontram as anomalias de menor velocidade, é caracterizada por uma extensa zona de baixa resistividade com valores abaixo de 25 ohm-m. Esta observação corrobora a hipótese de que essa área pode ser uma zona de maior umidade.

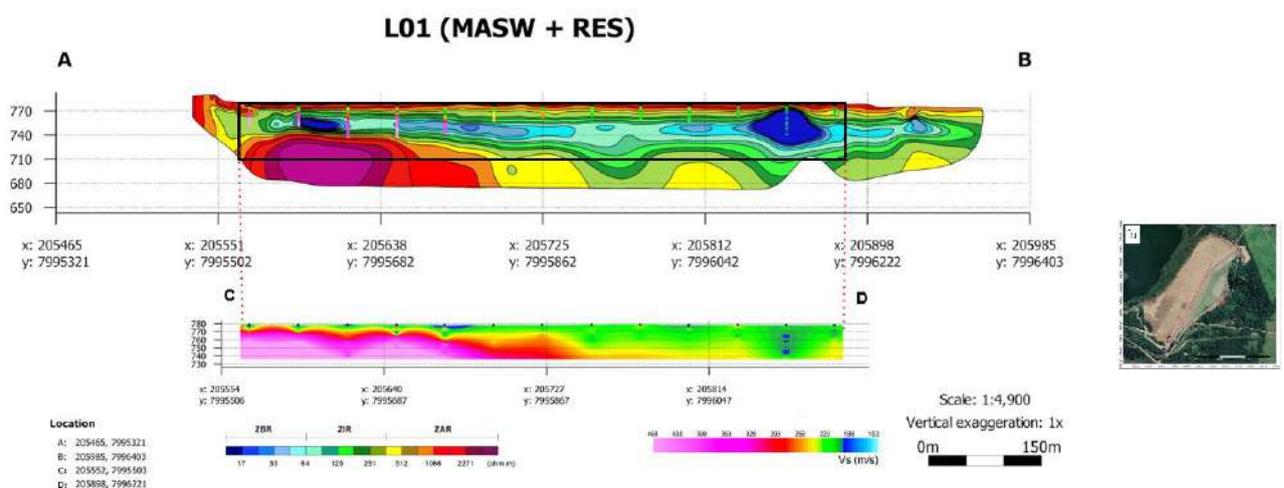


Figura 52: Corte no modelo 3D de eletrorresistividade em conjunto com a seção da L-01 do MASW.

Analisando os resultados obtidos pela modelagem implícita, valores muito baixos para o parâmetro de resistividade foram utilizados como referência na geração de sólidos,

denominados por “zonas de atenção”. Tais regiões caracterizam porções que fazem parte das zonas de baixa resistividade já descritas, porém com magnitudes anômalas, caracterizando regiões muito condutivas. Intervalos anômalos locais de baixa velocidade (<180 m/s) são observados em diferentes perfis.

Analisando a linha L-01, que é mais representativa, as maiores velocidades se apresentam predominantemente no início do perfil, possivelmente devido à influência da ombreira direita, onde há a presença de solo mais denso. Anomalias locais de baixa velocidade são observadas próximas à região da praia de rejeitos, entre 650 m e 750 m do início do perfil, e aproximadamente 250 m do início do perfil.

No caso do MASW realizado em julho de 2021, isso pode estar relacionado à infiltração da água proveniente do espigotamento, que, ao invés de aumentar a extensão da praia, penetrou no interior do maciço.

Embora o espigotamento seja uma atividade comum em barragens, o monitoramento permite observar o comportamento da estrutura durante essa atividade. Essa análise entre as medições de velocidade e resistividade, além das observações do espigotamento, proporciona uma visão abrangente da integridade da barragem.

A Erro! Fonte de referência não encontrada. apresenta a classificação de solos com base na média da variação de V_s nos primeiros 30 metros de profundidade (V_{s30}), conforme o Uniform Building Code (1997). Este protocolo de classificação é amplamente utilizado em diversos estudos que avaliam a propagação da velocidade da onda S no meio. De acordo com Foti et al. (2018), solos argilosos densos possuem valores de V_s entre 200 m/s e 600 m/s, enquanto solos argilosos apresentam valores de V_s entre 80 m/s e 200 m/s.

Tabela 2: Categorização de solos a partir de V_{s30} (UBC, 1997).

Classificação do tipo de solo	Descrição	Média de V_s (m/s)
A	Rocha dura	> 1500
B	Rocha	760 - 1500
C	Solo muito denso/rocha alterada	360 - 760
D	Solo denso	180 - 360
E	Solo mole	< 180

Todos os perfis analisados no MASW se enquadram na classificação D (solo denso), conforme a classificação do UBC. Nenhum perfil apresenta um valor médio de V_s inferior a 180 m/s (solo mole). No entanto, são observados intervalos anômalos locais de baixa velocidade (< 180 m/s) em diferentes perfis, os quais podem estar associados à presença de uma infiltração no solo.

As velocidades de propagação das ondas sísmicas são determinadas pelos módulos elásticos e pelas densidades dos materiais através dos quais elas se propagam. A velocidade de propagação da onda S (V_s) é função do módulo de cisalhamento (*shear modulus* – definido como a resistência do material às tensões de deformação por cisalhamento) e da densidade do material, com o módulo de cisalhamento, possuindo uma relação quadrática com V_s . Portanto, a variação de V_s é frequentemente usada como um indicador de rigidez, com menores valores de V_s associados a uma menor resistência ao cisalhamento.

Os materiais menos consolidados tendem a apresentar menores valores de velocidade de onda S (V_s), indicando uma menor resistência ao cisalhamento. Esta variação de V_s é crucial para a identificação de zonas potenciais de fragilidade dentro do maciço da barragem. Valores baixos de V_s , frequentemente correlacionados com zonas de baixa resistividade (ZBR), indicam regiões no maciço que podem estar sujeitas à presença de umidade ou possuírem solo menos denso.

9. CONCLUSÃO

A correlação entre baixa resistividade e baixa velocidade é essencial para identificar regiões anômalas na estrutura da barragem, como a presença de umidade no solo. Além disso, a visualização dessas zonas em um modelo 3D fornece uma compreensão mais completa da distribuição espacial das anomalias (Figura 53). A modelagem 3D permite uma análise mais detalhada tanto da extensão quanto da profundidade das áreas anômalas, sendo possível observar a continuidade e a interconexão das zonas de baixa resistividade e de baixa velocidade, ajudando a determinar as áreas anômalas do maciço.

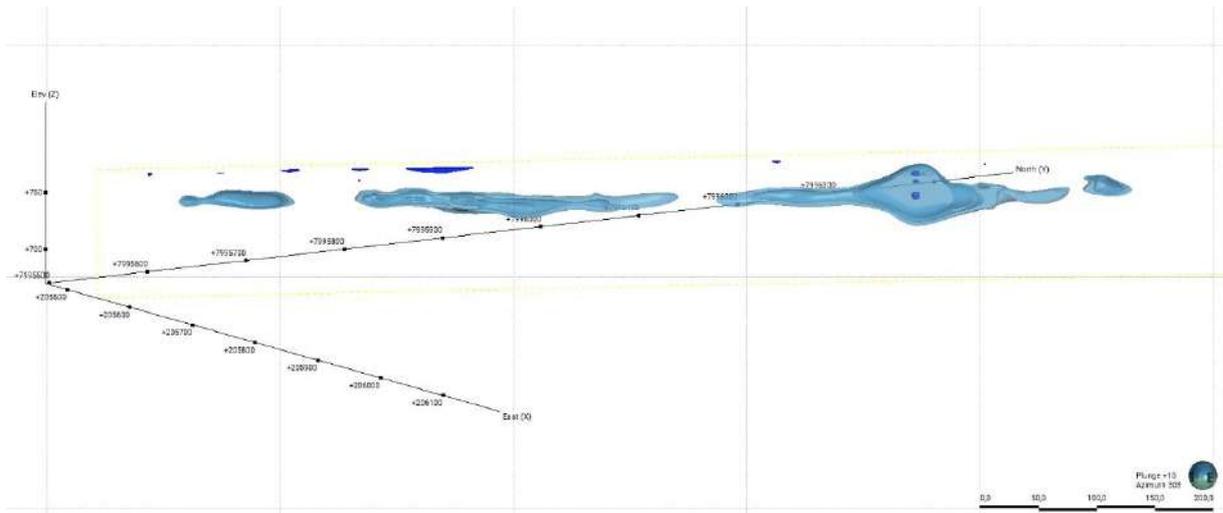


Figura 53: Corte no modelo 3D mostrando a extensão das regiões de baixas velocidades associadas a zonas de baixa resistividade.

Os dados de microssísmica revelaram uma queda na velocidade das ondas sísmicas associadas ao espigotamento ocorrido entre fevereiro e julho de 2021, um padrão que até então não havia sido observado. Este comportamento inédito indica uma possível correlação entre o processo de aumento da praia da barragem e a diminuição da velocidade, sugerindo que a infiltração da água proveniente dessa atividade possa estar influenciando o maciço. Essa nova observação ressalta a importância do monitoramento contínuo para identificar e mitigar possíveis riscos.

Os resultados obtidos a partir da metodologia MASW demonstraram claramente a presença de zonas de baixa velocidade ao longo do maciço. Essas zonas, identificadas ao longo dos perfis analisados, indicam áreas onde o solo pode estar com uma maior presença de umidade.

A análise dos dados geofísicos, integrando resistividade e velocidade das ondas S, possibilita a identificação de anomalias no maciço. Esses métodos aliados a ferramentas capazes de monitorar em tempo real as propriedades físicas de uma barragem, permitem mapear e monitorar essas zonas anômalas e antecipar medidas preventivas ou corretivas. A implementação de sistemas de monitoramento em tempo real, como a microssísmica, aliada à análise periódica dos dados geofísicos, pode fornecer informações sobre possíveis alterações das propriedades físicas do maciço, permitindo respostas rápidas e eficazes.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAL G. Z. A., ISMAIL A. M., ANDERSON, N. L. & ATEKWANA, E. A. 2004. **Geophysical Investigation of Seepage from an Earth Fill Dam, Washington County, MO.** Journal of Applied Geophysics, v. 44, p. 167-180.
- ABU-HASSANEIN ZS, BENSON CH & BLOTZ LR. 1996. **Electrical resistivity of compacted clays.** Journal of Geotechnical Engineering, 397–406.
- ALBUQUERQUE, R; BRAGA, M. A.; OLIVEIRA, L. A; DIAS, L. S. O; ALMEIDA, L. A. P; OLIVEIRA, A. H; BRANDAO, S. 2019. **Caracterização de Barragens de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo.** Anuário do Instituto de Geociências – IGEO, UFRJ. 13 p.
- ALMEIDA, F. F. M. 1977. **O Cráton do São Francisco.** Revista Brasileira de Geociências, 7: 349-364;
- ALMEIDA F. F. M. DE; HASUI Y.; BRITO-NEVES B. B. DE; FUCK R. A. 1977. **As províncias estruturais do Brasil.** In: SBG, Simp. Geol. Nordeste, 8, Bol. Esp., 12p;
- BARBOSA, O. 1955. **Guia das Excursões.** In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Araxá, 1955, Not. 3. Soc. Bras. Geol., São Paulo, p. 3-5;
- BARBOSA, O. 1963. **Geologia econômica e aplicada a uma parte do Planalto Central Brasileiro.** Goiânia: DNPM/PROSPEC, 70p;
- BARBOSA, O. et al. 1966. **Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia.** Departamento Nacional de Produção Mineral. Divisão de Geologia e Mineralogia, Monografia, 19, 94 p. Rio de Janeiro;
- BARBOSA, O. et al. 1970. **Geologia da região do Triângulo Mineiro.** Boletim da Divisão de Fomento à Produção Mineral do DNPM, Rio de Janeiro, v. 136, 140 p;
- BIZAO, A.H.N., & OLIVEIRA, A.L.L. de. 2018. **Contribuição ao estudo do monitoramento microssísmico voltado para a mineração.** Universidade Federal de Viçosa.
- BRAGA, A. C. O. 2006. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática.** Rio Claro. 123 p.
- BROD, J. A., GASPAR, J. C., DE ARAÚJO, D. P., GIBSON, S. A., THOMPSON, R. N., & JUNQUEIRA-BROD, T. C. 2001. **Phlogopite and tetra-ferriphlogopite from Brazilian carbonatite complexes: petrogenetic constraints and implications for mineral-chemistry systematics.** Journal of Asian Earth Sciences, 19(3), 265-296.
- BROD, J. A., RIBEIRO, C. C., GASPAR, J. C., JUNQUEIRA-BROD, T. C., BARBOSA, E. S. R., RIFFEL, B. F., SILVA, J.F., CHABAN, N., & FERRARI, A. J. D. 2004. **Geologia e mineralizações dos complexos alcalinoscarbonatíticos da província ígnea do Alto Paranaíba.** In Roteiro de excursão do Congresso Brasileiro de Geologia, XLII, Araxá, Minas Gerais, Brazil.

CANATTO, B. F. 2021. Geofísica eletrorresistiva aplicada ao monitoramento temporal da percolação de fluidos no interior de estruturas de barragens. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá. 109 p.

CPRM, 2008. **Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Org. por Maria Luiza Osório Moreira, Luiz Carlos Moreton, Vanderlei Antônio de Araújo, Joffre Valmório de Lacerda Filho e Heitor Faria da Costa. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC - FUNMINERAL, 143 p.

CORDEIRO, P. F., BROD, J. A., DANTAS, E. L., & BARBOSA, E. S. 2010. **Mineral chemistry, isotope geochemistry and petrogenesis of niobium-rich rocks from the Catalão I carbonatite-phoscorite complex, Central Brazil**. *Lithos*, 118(3-4), 223-237.

CUNHA, J. B. V. 2018. **Obtenção e caracterização de fotocatalisadores heterogêneos a partir de rejeito da mineração de ferro e sua aplicação na remoção de contaminantes emergentes. Dissertação de mestrado**. Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais. 97p.

DENOLLE, M. A.; NISSEN-MEYER, T. **Quiet anthropocene, quiet Earth**. *Science*, v. 369, n. 6509, p. 1299–1300, 2020.

DIAS, L. S. O.; OLIVIER, G.; ARAÚJO, R. N.; BARBOSA, M. R.; BRANDI, I.; FERREIRA, M. L.; BRAGA, M. A. d. S.; GOMES, R. C. 2016. **A microseismic monitoring pilot project of natural caves in Carajás – PA**. In: Proceedings of the 7 Simpósio Brasileiro de Geofísica. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Geofísica. p. 1–4.

DOURADO, J.C. 1984. **A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos “in situ”**. Publicações de artigos técnicos da ABGE, São Paulo, n.8, 12 p,

EATON, D. W.; BAAN, M.; INGELSON, A. **Terminology for fluid-injection induced seismicity in oil and gas operations**. *CSEG RECORDER - FOCUS ARTICLE*, v. 41, p. 5, 2016.

FOTI, S., HOLLENDER, F., GAROFALO, F., ALBARELLO, D., ASTEN, M., BARD, P. Y., COMINA, C., CORNOU, C., COX, B., DI GIULIO, G., FORBRIGER, T., HAYASHI, K., LUNEDI, E., MARTIN, A., MERCERAT, D., OHRNBERGER, M., POGGI, V., RENALIER, F., SICILIA, D., & SOCCO, V. (2018). Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the Inter PACIFIC project. In *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 16, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>;

IBRAM, 2013. Apresentação realizada em Manaus, pelo Gerente Executivo no IBRAM Amazônia, Ronaldo Lima. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004226.pdf>>.

GIBSON, S. A., THOMPSON, R. N., LEONARDOS, O. H., DICKIN, A. P., & MITCHELL, J. G. 1995. **The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil**. *Journal of Petrology*, 36(1), 189-229.

KIM, J. K.; OH, T. S.; YOO, S. H.; WEE, S. H. **Amplification characteristics of seismic observation sites from S-wave energy, coda waves and background noise from the Fukuoka earthquake series**. *Exploration Geophysics*, v. 48, n. 3, p. 264–271, 2017. ISSN 0812-3985, 1834-7533.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.-J. 2008. **Environmental geology: Handbook of field methods and case studies**. Berlin: Springer, v. 1,.

- LAGO, A. L.; GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R. 2006. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 3, p. 357-374, abr./ago.
- LAROSE, E. **Noise interferometry: From imaging to monitoring**. In: The 22nd International Congress on Sound and Vibration. Itália: International Institute of Acoustics and Vibration, 2015. p. 7.
- LARSSON, K. 2004. **Seismicity in Mines A Review**. Luleå University of Technology Technical, Luleå.
- LIMA, R. E.; PICANÇO, J. L.; SILVA, A. F.; ACORDES, F. A. **An anthropogenic flow type gravitational mass movement: the Córrego do Feijão tailings dam disaster, Brumadinho, Brazil**. Landslides, v. 17, n. 12, p. 2895–2906, 2020. ISSN 1612-510X, 1612-5118.
- LOWRIE, W. 2007. **Fundamentals of Geophysics**. In Second Edi. Cambridge University Press, Zurich.
- MACHADO, W. G. F. 2007. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Tese de Mestrado. 155 p.
- MENDECKI, A. J. 2013. **Mine Seismology: Glossary of Selected Terms Seismic Waves in Rock**. The 8th Rockburst and Seismicity in Mines Symposium, September. doi:10.13140/2.1.1182.7846.
- NIMBALKAR, S.; ANNAPAREDDY, V. R.; PAIN, A. **A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 10, n. 6, p. 1082–1090, 2018. ISSN 16747755.
- NOVAES, L. C. 2018. Processos metalogênicos associados a complexos alcalino-carbonatíticos da Província ígnea Alto Parnaíba, sudeste brasileiro. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia. Universidade Federal do Paraná. 93 p.
- PARK, C. B., MILLER, R. D., XIA, J. 1999. **Multichannel analysis of surface waves**. Geophysics, v. 64, p 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>.
- RIBEIRO, A. G; BATISTA; D. ASSIS, L; ALVES, J. M; SANTOS, D. J. S. 2023, **Métodos elétricos Aplicados à Barragem de Rejeito – Barragem Grupo**. Em: Anais do XX COBRAMSEG Campinas: Galoá.
- RIBEIRO, C. C. 2008. **Geologia, Geometalurgia, Controles e Gênese dos Depósitos de Fósforo, Terras Raras e Titânio do Complexo Carbonatítico Catalão I, GO**. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/1695>
- ROSA FILHO JC. 2002. **Modelagem sísmica de ondas elásticas e migração reversa no tempo em meios transversalmente isotrópicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ - Brazil.
- SOUZA, L. A; GANDOLFO, O. 2012. **Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2. 9-27.
- TEIXEIRA, W., TOLEDO, M.C.M., FAIRCHILD, T.R., TAIOLI, F. 2008. **Decifrando a Terra**. In 8a. Editora Nacional, São Paulo.

TELFORD, W. M.W.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 2. ed. London: Cambridge University Press, 1990. 792 p.

OLIVEIRA, L. A. **Caracterização de barragens de rejeito através de métodos geofísicos elétricos: estudo de caso na barragem B1 de Cajati, São Paulo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Graduação em Geologia. Trabalho de Conclusão de Curso. 2018. p.

OLIVIER, G.; BRENGUIER, F.; WIT, T.; LYNCH, R. **Monitoring the stability of tailings dam walls with ambient seismic noise**. *The Leading Edge*, v. 36, n. 4, p. 9, 2017. Publisher: Society of Exploration Geophysicists.

UNIFORM BUILDING CODE (UBC). 1997. **Structural Engineering Design Provisions**. International Conference of Building Officials, Whittier, p. 492;

WAPENAAR, K.; DRAGANOV, D.; SNIEDER, R.; CAMPMAN, X.; VERDEL, A. **Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications**. *Geophysics*, v. 75, n. 5, p. 221-240., 2010. ISSN 0016-8033, 1942-2156.

WIT, T. & OLIVIER, G. 2018. **Imaging and monitoring tailings dam walls with ambient seismic noise**. Australian Centre for Geomechanics: 455-463.