

AMANDA MENDES BEZERRA

**INTEGRAÇÃO DE MASW, PIEZOCONE E INTERFEROMETRIA SÍSMICA DE RUÍDO
AMBIENTE PARA O MONITORAMENTO DA BARRAGEM DE CATALÃO, GO**

Trabalho Final de Curso
(Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro – RJ
Novembro de 2024



AMANDA MENDES BEZERRA

**Integração de MASW, Piezocone e Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente
para o monitoramento da barragem 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
Novembro de 2024

Amanda Mendes Bezerra

Integração de MASW, Piezocone e Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente para o monitoramento da barragem de Catalão, GO

/ Amanda Mendes Bezerra – Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO, 2024.

xii, 47 p.

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, Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha

AMANDA MENDES BEZERRA

Integração de MASW, Piezocone e Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente para o monitoramento da Barragem 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

Demetrius Cunha Gonçalves da Rocha

Aprovado em: ___/___/___

Por:

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

Dr. Alan de Souza Cunha (UFRJ)

Dr. João Paulo Porto Barros (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro – RJ
Novembro 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Ana Paula e Alexandre, bem como a minha família pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Vocês sempre foram minha principal fonte de inspiração e motivação, proporcionando o suporte necessário para que eu pudesse superar cada desafio. Sem vocês, esta conquista não seria possível.

Agradeço também aos meus orientadores, Marco e Demetrius, pela orientação precisa, dedicação, ensinamentos, conselhos e por acreditar no meu potencial desde o início deste projeto. Sua expertise e conselhos foram fundamentais não só para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos meus amigos de laboratório e aos demais pesquisadores, principalmente a Filipa, Lucas e João Paulo que, com seu apoio, conhecimento e colaboração, foram essenciais para a realização deste projeto. Em especial, gostaria de agradecer à Juliana por esses anos de parceria, dedicação e trocas de conhecimento que foram fundamentais em cada etapa do processo. Agradeço a todos pelo ambiente de trabalho acolhedor e pelas discussões enriquecedoras que contribuíram imensamente para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores da Universidade Federal do Rio de Janeiro expressei meu reconhecimento pela excelência no ensino e pela disposição em compartilhar seus vastos conhecimentos. Vocês contribuíram significativamente para a minha formação, instigando o pensamento crítico e a busca contínua pelo saber.

Aos meus colegas de curso agradeço por compartilharem comigo essa caminhada, oferecendo apoio, incentivo e amizade em momentos cruciais. A convivência com vocês tornou essa experiência acadêmica muito mais rica e gratificante. Em especial para a Sofia, pelos estudos, altos, baixos, campos e companheirismo essenciais para me tornar melhor profissional e pessoa.

Não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de incentivo, sugestões ou apoio técnico. Cada contribuição foi essencial para que este projeto se concretizasse.

DISCLAIMER

Eu, Amanda Mendes Bezerra, declaro que esse trabalho de conclusão de curso intitulado “Integração de MASW, Piezocone e Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente para o monitoramento da Barragem de Catalão, GO” possui inteiramente e exclusivamente caráter 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, 11/08/2024

RESUMO

MENDES, Amanda. Integração de MASW, Piezocone e Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente para o monitoramento da barragem de Catalão, GO. 2024. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW) é um método geofísico utilizado para determinar a velocidade de propagação das ondas cisalhantes (V_s) e, conseqüentemente, o módulo de cisalhamento máximo dos materiais (G_{max}). Esta técnica fundamenta-se nas características dispersivas da propagação das ondas Rayleigh no meio. A presente pesquisa incluiu a aquisição do MASW em uma barragem monitorada em tempo real por um sistema de interferometria sísmica de ruído ambiente, composto por oito geofones com 4.5 Hz de frequência instalados na estrutura: seis uniaxiais ao longo da crista e pé da estrutura, além de dois triaxiais na ombreira. Esse método utiliza ondas de superfície que permitem mapear a variação da velocidade no meio em tempo real na estrutura com sensibilidade suficiente para identificar prontamente mudanças mínimas da ordem de um décimo na velocidade das ondas cisalhantes ($dv/v\%$), indicando um aumento ou diminuição da rigidez (G_{max}) da estrutura associado a deformações leves do terreno. Dessa forma, ao combinar os resultados de (V_s) gerados pelo MASW (T_0) com a técnica de interferometria sísmica de ruído ambiente ($dv/v\%$), foi possível determinar o valor de (V_s) ao longo do tempo (T_1). A utilização do MASW juntamente com Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente mostrou-se eficaz para a geotecnia ao determinar o valor de V_s ao longo do tempo, além de viabilizar a comparação entre as zonas de maiores velocidade de onda de cisalhamento ao longo do tempo na área da crista da barragem. Outro aspecto da pesquisa foi utilizar os resultados de cinco ensaios de piezocone (CPTU) para correlacionar com modelos de nível d'água na estrutura, permitindo identificar o nível de água no terreno, suas variações e influência nos resultados de V_s .

Palavras-chave: Geofísica, Barragem de rejeitos, Microsísmica, Ondas de Cisalhamento

ABSTRACT

MENDES, Amanda. Integration of MASW, Piezocone, and Ambient Noise Seismic Interferometry for Monitoring the Catalão Dam, GO. 2024. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) is a geophysical method used to determine the shear wave velocity (V_s) and, consequently, the maximum shear modulus of materials (G_{max}). This technique is based on the dispersive characteristics of Rayleigh wave propagation in the medium. The present research included the acquisition of MASW data on a dam monitored in real-time by an ambient noise seismic interferometry system, with eight geophones with frequencies of 4.5 Hz installed on the structure: six uniaxial and two triaxial along the crest, dam body, abutments, and toe of the structure. This method uses surface waves called shear waves with a dispersive nature. These waves allow mapping the velocity variation in the medium in real-time on the structure with sufficient sensitivity to promptly identify minimal changes of the order of one-tenth in shear wave velocity ($dv/v\%$), indicating an increase or decrease in the structure's stiffness (G_{max}) associated with slight ground deformations. Thus, by combining the results of (V_s) generated by MASW (T_0) with the ambient noise seismic interferometry technique ($dv/v\%$), it was possible to determine the value of (V_s) over time (T_1). The use of MASW together with Ambient Noise Seismic Interferometry proved effective for geotechnics in determining the value of V_s over time, as well as enabling the comparison between zones of higher or lower shear wave velocity over time in the dam crest area. Another aspect of the research was to use the results of five piezocone tests (CPTU) to correlate with water level models in the structure, allowing the identification of the water level in the ground, its variations, and influence on the V_s results.

Key words: Geophysics, Tailings Dam, Microseismic, Shear Wave

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da barragem BR de Catalão (Fonte: Google Earth 2024).	3
Figura 2: Elementos da barragem. (fonte: Empresa que administra a estrutura).....	4
Figura 3: Estruturas do sistema de drenagem interna (2018). (fonte: Empresa que administra a barragem).	5
Figura 4: Curvas de variação de velocidade (%).	7
Figura 5: :A) Imagem da tubulação de espigotamento na praia da barragem. B) Localização dos geofones da ANSI e baias de espigotamento.	8
Figura 6: Curvas de variação de velocidade (%) entre o período de aquisição do MASW e as linhas calculadas a partir da ANSI. (Fonte: Empresa responsável pela barragem).	8
Figura 7: Representação das ondas Rayleigh.	10
Figura 8: Assinatura sísmica da interferometria sísmica do ruído ambiente. Linha vermelha destacando o background da ANSI. (Adaptado de Olivier, Gerrit et al., 2015).	11
Figura 9: Esquematização do pareamento dos geofones. (Fonte: autora)	13
Figura 10: Esquema exemplificando o ruído ambiente e a correlação pela função de Green. (Snieder R., 2006)	13
Figura 11: Mapa de localização dos geofones e das estações sísmicas do sistema de monitoramento microssísmico da Barragem BR.	14
Figura 12: Exemplo de uma seção sísmica com registro do ground-roll (onda Rayleigh). Fonte: adaptado de Hayashi (2008).	16
Figura 13: Transformação integral no domínio da frequência: imagem de velocidade de fase versus frequência. Fonte: adaptado de Hayashi (2008).	16
Figura 14: Fluxo de tratamento de dados. A) Seção sísmica no domínio do tempo; B) Transformação integral dos dados no domínio da frequência: imagem de velocidade de fase versus frequência e picks de velocidade associados ao modo fundamental de vibração; C) Inversão da curva de dispersão observada e encaixe de uma curva teórica calculada; D) Perfil calculado da variação de Vs em profundidade. Fonte: adaptado de Hayashi (2008).	17
Figura 15: Mapa de localização da área de estudo com a distribuição dos quatro perfis de aquisição MASW. O número de identificação das linhas indica o início de cada perfil de aquisição de dados.	18
Figura 16: Fotos dos equipamentos da base de aquisição de dados. A) Um sismógrafo Geode de 24 canais para digitalização das formas de onda observadas por geofones; B) Um computador com software de aquisição de dados.	19

Figura 17: Representação da utilização dos dados de Vs como T0 e a ANSI como T1. (fonte: Empresa que administra a estrutura).	20
Figura 18: Localização dos geofones utilizados para interferometria sísmica do ruído ambiente e localização dos pontos de aquisição do MASW.	21
Figura 19: Círculos destacando a seleção dos geofones utilizados para correlação do MASW com a ANSI.	22
Figura 20: Curvas de variação de velocidade (%) entre o período de aquisição do MASW e as linhas calculadas a partir da ANSI.....	22
Figura 21: Localização dos ensaios de piezocone distribuídos na estrutura.....	24
Figura 22: Localização dos ensaios de piezocone distribuídos ao longo da L01 de MASW em T0.	24
Figura 23: Localização dos indicadores de nível d'água na barragem.....	25
Figura 24: Índice Pluviométrico em Catalão (Go) entre julho de 2021 e 2022. (Dados provenientes da empresa contratante).....	26
Figura 25: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-01.....	27
Figura 26: Localização da L01 na barragem. Localização dos Sensores de 2, 6, 5 e 4.	28
Figura 27: Seção A-B referente a interpolação 2D da L01 de MASW (T0); além do posicionamento dos Sensores 2, 6, 5 e 4 ao longo da linha.	28
Figura 28: Variação de velocidade de cada geofone em julho 2022.	29
Figura 29: Gráficos correspondentes a variação de velocidade durante julho de 2021 e 2022. A= S2; B; S6; C=S5; D=S4.....	30
Figura 30: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos em T1 para o geofone 2 (S2), geofone 6 (S6), geofone 5(S5) e geofone 4 (S4) respectivamente.	34
Figura 31: A esquerda os perfis de Vs plotados em profundidade ao Longo da L01 e resultados em m/s referentes a T1. A esquerda, localização dos geofones S2, S6, S5 e S4 vistos em planta.....	34
Figura 32: Perfis 1D de Vs em profundidade para os Sensores 2, 6, 5 e 4 respectivamente.....	35
Figura 33: Comparação entre os perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos em T0 (esquerda) e T1(direita) para o geofone 2 (Imagem A), geofone 6 (imagem B), geofone 5(imagem C) e geofone 4 (imagem D) respectivamente.....	36
Figura 34: Seção A-B referente a interpolação 2D da L01 de MASW (T0); além do posicionamento dos Sensores 2, 6, 5 e 4 ao longo da linha. OD = Ombreira Direita.	38

Figura 35: Seção combinada entre T0 e T1 destacando as zonas de baixas velocidades ao longo do período do estudo. 38

Figura 36: Superfície de nível d'água interpolada a partir dos indicadores de nível d'água em julho de 2021. A superfície azul e triangulada representa o nível d'água e acima dela em cinza com certa transparência é encontrada a superfície topográfica da barragem sem a presença de água. A = Visada da barragem a jusante; B = Visada da barragem a partir da ombreira direita. 39

Figura 37: Superfície de nível d'água interpolada a partir dos indicadores de nível d'água em julho de 2022 (imagem B e B.1). A superfície azul e triangulada representa o nível d'água e acima dela em cinza com certa transparência é encontrada a superfície topográfica da barragem sem a presença de água. A = Visada da barragem a jusante; B = Visada da barragem a partir da ombreira direita. 40

Figura 38: Correlação entre os Indicadores de nível d'água e ensaios de piezocone em 2021. 41

Figura 39: Comparação do modelo 2D entre T0 e T1. Traços pontilhados indicando a localização dos geofones. 42

Figura 40: Seção combinada em relação a T0 e T0. Linhas tracejadas indicando a localização do S2, S6, S5 e S4 respectivamente. 42

Figura 41: A) Nível d'água interpolado a partir dos INAs. B) Nível d'água inferido a partir dos dados de CPTU, (superfície azulada com transparência). 43

LISTA DE SIGLAS

ANSI – Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente

CE – Caminhamento Elétrico

CPGA – Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada

CPTU – Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement

ER – Eletrorresistividade

fNAT – Frequência natural

IMS – Institute of Mine Seismology

INA – Indicadores de nível d'água

N.A – ível de água

OD – Ombreira Direita

OE – Ombreira Esquerda

PNSB – Plano Nacional de Segurança de Barragens

PZ – Piezômetros

PZ – Piezômetros Casa Grande

SPT – *Standard Penetration Test*

ZAR – Zonas de alta resistividade

ZBR – Zonas de baixa resistividade

ZIR – Zonas de resistividade intermediária

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVO.....	2
3.	ÁREA DE ESTUDO	2
4.	CONTEXTUALIZAÇÃO	3
4.1.	Disposição de rejeitos	3
4.2.	Barragem de Catalão	5
4.3.	Interpretação geológico-geotécnica	5
4.4.	Levantamentos geofísicos prévios	6
4.5.	Histórico do monitoramento através da interferometria sísmica de ruído ambiente.....	7
5.	ONDAS.....	9
6.	METODOLOGIA.....	10
6.1.	Interferometria Sísmica do ruído ambiente (ANSI).....	10
6.2.	Multichannel Analysis of Surface Waves	14
6.3.	Aquisição do MASW	17
6.4.	Determinação das áreas de menor velocidade de ondas da barragem (T0 e T1).....	19
6.5.	Ensaio de Piezocone (CPTU).....	23
6.6.	Indicadores de Nível d'água (INAs)	24
7.	RESULTADOS.....	25
7.1.	Índice Pluviométrico	25
7.2.	Modelos 1D e 2D de MASW em T0.....	26
7.3.	Análises de variações de velocidade.....	29
7.4.	Modelo 1D de MASW em T1	33
7.5.	Modelo 1D em T1 e T0	36
7.6.	Modelo 2D em T1	37
7.7.	Seção combinada.....	38
7.8.	Modelo de Nível d'água (2021 e 2022).....	39
7.9.	Ensaio de piezocone (CPTU)	40
8.	DISCUSSÕES	41
8.1.	Modelo 2D em T0 e T1	41
8.2.	CPTU.....	43

9.	CONCLUSÃO.....	43
10.	REFERÊNCIAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

Barragens de rejeitos são consideradas por Cardozo et al. (2016) como uma das maiores estruturas geotécnicas construídas pelo homem. Essas estruturas são construídas pela humanidade há milênios para diversos usos, como: armazenamento de água, controle de vazão, geração de energia, disposição de rejeitos para mineração, entre outros. Durante a história, ocorreram algumas rupturas de barragens de mineração e Azam & Li (2010) fazem uma revisão mundial de falhas em barragens de rejeito. Um dado interessante, é que cerca de 1,2% das barragens de rejeito apresentaram algum tipo de falha nos últimos 100 anos (antecessores à publicação), contra 0,01% das barragens civis.

No Brasil, a mineração é um setor fundamental da economia, responsável por fornecer matérias-primas que são a base para a produção de bens essenciais ao bem-estar da sociedade (Hermida, 2016). Atualmente, com o avanço da mineração e a preocupação ambiental, o assunto barragens de rejeito vem ganhando merecida atenção por serem estruturas complexas de contenção e armazenamento de mistura de resíduos fluidos e sólidos gerados pela produção de minérios nas quais os últimos acidentes envolvendo o rompimento dessas estruturas mostraram a necessidade de buscar métodos eficazes de monitoramento para essas estruturas a fim de prevenir novos desastres.

Tradicionalmente, o monitoramento de barragens de rejeito ocorre através de instrumentos de auscultação, que inspecionam alguns parâmetros geotécnicos da estrutura, e pela inspeção visual rotineira (Oliveira, L. A., 2018). Entretanto, a aplicação desses métodos se limitava à detecção de mudanças pontuais. Atualmente, resultados promissores vêm sendo obtidos através do monitoramento contínuo dessas estruturas por meio da microssísmica, pela abordagem de interferometria sísmica de ruído ambiente e, além disso, a integração de técnicas, métodos e interdisciplinaridade vem se mostrando cada vez mais efetiva para entender as propriedades físicas e o comportamento da estrutura (Rodrigues, 2019).

Dessa forma, o monitoramento das barragens de rejeito através da integração dos métodos geofísicos e ensaios geotécnicos possibilita obter mais rapidamente informações complementares para o entendimento dos parâmetros do subsolo, que permitem além de definir o perfil geotécnico, comparar valores medidos de forma direta e indireta. Neste trabalho, destaca-se a aplicação conjunta das técnicas de interferometria sísmica de ruído ambiente (ANSI), Multichannel Analysis of Surface

Waves (MASW) para o estudo da análise do comportamento das ondas S. Além disso, e o ensaio de piezocone (CPTU) foi utilizado para monitorar o nível d'água na estrutura e sua influência ao longo do maciço.

2. OBJETIVO

Integrar métodos geofísicos e geotécnicos a fim de monitorar parâmetros que influenciam no aumento ou diminuição de rigidez, ou módulo de cisalhamento, da barragem de Catalão ao longo do tempo.

Para isso, os objetivos específicos do trabalho envolvem a análise do comportamento das ondas S ao longo do tempo na barragem integrando os métodos de análise multicanal de ondas de superfície (MASW) com a interferometria sísmica do ruído ambiente (ANSI). Além disso, correlacionar os valores de poropressão obtidos por ensaios CPTU com o nível d'água na estrutura para inferir o nível d'água onde não houver informação de indicadores de nível d'água.

3. ÁREA DE ESTUDO

O reservatório da barragem, assim como o maciço principal e sistema extravasor, estão localizados no município de Catalão, estado de Goiás. A mina do Complexo Mineroquímico de Catalão (CMC), e sua respectiva usina de beneficiamento, encontram-se instaladas na região do Chapadão (Fazenda Chapadão), a cerca de 20 km da cidade de Catalão, na zona rural do município. Os acessos ao CMC ocorrem pela rodovia federal BR - 050 e pela rodovia estadual GO - 330, que ligam, respectivamente, este município à capital federal - Brasília e à capital do estado – Goiânia (Figura 1).

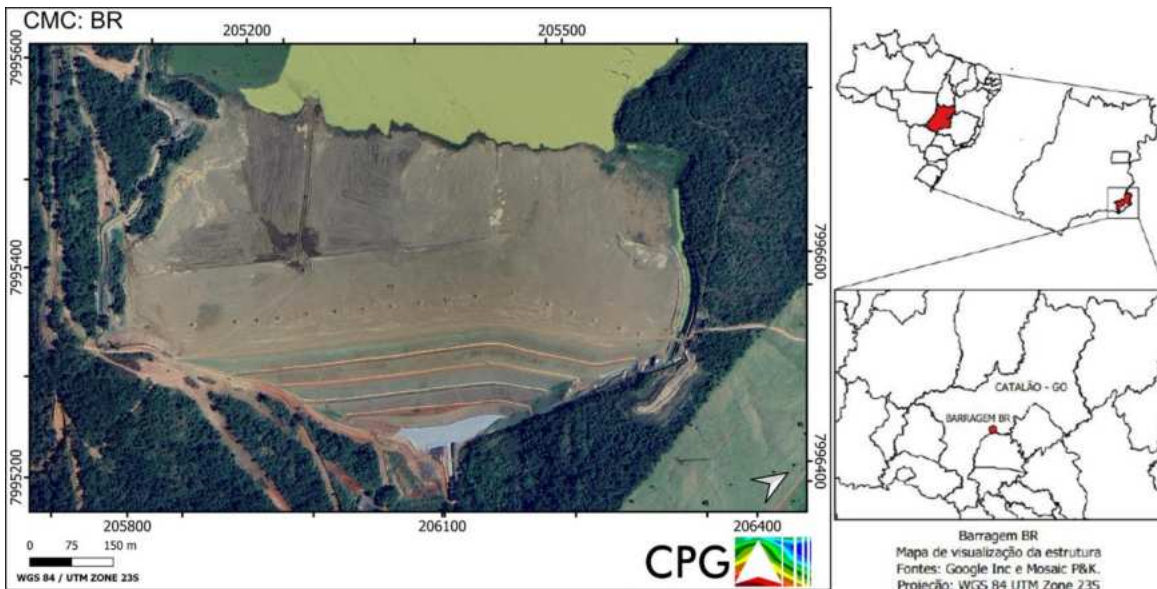


Figura 1: Localização da barragem BR de Catalão (Fonte: Google Earth 2024).

4. CONTEXTUALIZAÇÃO

4.1. Disposição de rejeitos

Uma barragem de rejeito é, normalmente, planejada para ser construída em etapas, estas etapas são definidas segundo a necessidade do empreendimento e o ritmo de lavra. Desta forma, à medida que são gerados rejeitos, os alteamentos são executados (Duarte, 2008). A primeira etapa é um aterro inicial ou um dique de partida, construído com solo compactado. As etapas seguintes são os sucessivos alteamentos. Eles podem ser feitos utilizando o próprio rejeito ou materiais externos de área de empréstimo ou de estéril de mina (Dornas, 2008; Silva, 2010; Rezende, 2013).

Segundo Bittar (2006), a construção de barragens de rejeito está, normalmente, associada a tecnologias de baixo custo e muitas vezes, é realizada pela equipe técnica e com equipamentos da própria mineradora. Sobre os alteamentos feitos com o próprio rejeito o autor cita vantagens e desvantagens. A grande vantagem é o baixo custo envolvido, uma vez que os alteamentos não são executados de uma só vez, e sim em etapas, de acordo com a necessidade do empreendimento. Porém, como desvantagem, é verificado que os rejeitos dependem de técnicas e métodos para ajustar suas propriedades para então se tornarem ideais para construção de barragens, principalmente no que diz respeito à susceptibilidade à liquefação destes materiais, além da sua excessiva erodibilidade superficial e dificuldade de

compactação. As barragens são construídas contendo os seguintes elementos, como (Figura 2):

- a) Fundação da barragem: formação geológica que irá suportar o maciço e o material depositado durante e depois da construção;
- b) Sistema de drenagem interna: constituídos por drenos de fundo, colchões drenantes
- c) Drenos verticais: tem como tarefa manter baixo o nível freático;
- d) Corpo da barragem/maciço: composto por material compactado ou não, de forma a ser a barreira física ao fluxo do material represado;
- e) Ombreiras: marca o contato lateral do barramento com o solo/rocha in-situ;
- f) Drenagem superficial: constituídos de valetas, canaletas, descidas de água e canais que são necessários para o controle do escoamento de água pluvial;
- g) Sistema extravasor: composto, geralmente, por canal ou galeria com o objetivo de transportar, com segurança, as cheias ocorridas na bacia de contribuição da barragem, desviando-as do maciço para que o galgamento do reservatório não ocorra.

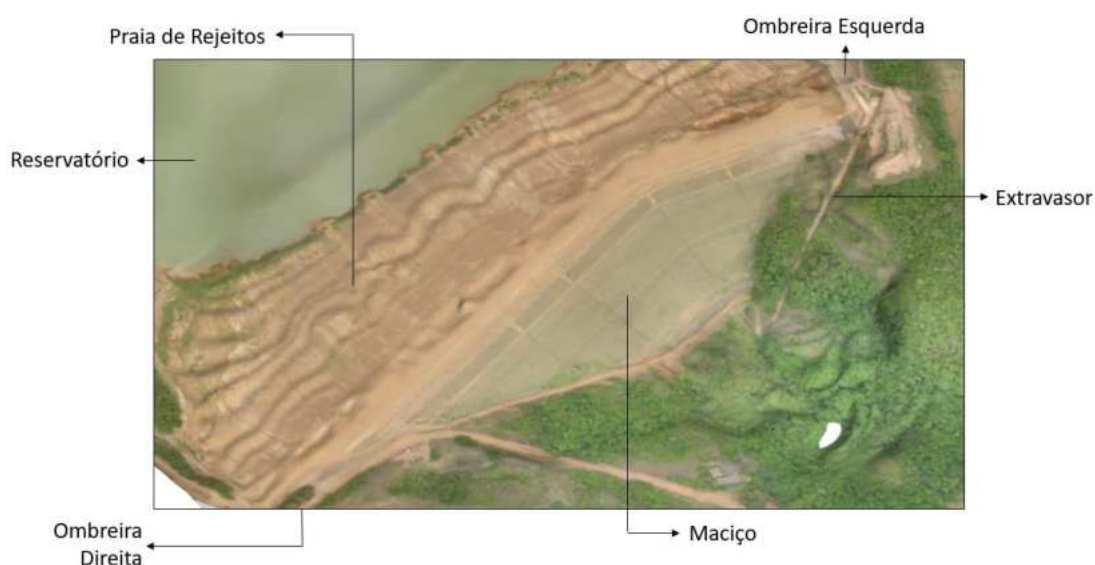


Figura 2: Elementos da barragem. (fonte: Empresa que administra a estrutura, relatório NGG-004-01-TX-2021-RT-00).

4.2. Barragem de Catalão

A utilização de rejeitos ciclados na barragem possui a função de conter os rejeitos totais gerados pelo beneficiamento de rocha fosfática, produzindo matéria-prima utilizada pela indústria para fabricação de fertilizantes agrícolas. O aterro da Barragem BR foi construído a partir de um aterro primitivo executado com solo argiloso, com crista inicialmente na cota 743,00 m, sucedido por 3 (três) etapas de alteamento até atingir o patamar atual de crista em 778,00 m

O maciço atual possui um comprimento de, aproximadamente, 1.040,00 m e largura média de 30,00 m. O talude de jusante inicia-se a partir de um enrocamento do dreno de pé junto ao terreno natural na cota aproximada de 722,00 m. A barragem possui 6 (seis) bermas de equilíbrio com largura mínima de 5,30 m, posicionadas e niveladas nas cotas 733,00 m, 748,00 m, 758,50 m, 764,00 m, 769,50 m e 773,00 m. A Figura 3 representa as estruturas de drenagens superficiais da barragem, formada por canaletas trapezoidais, meia-cana, descida em degraus, drenagem periférica, entre outros.

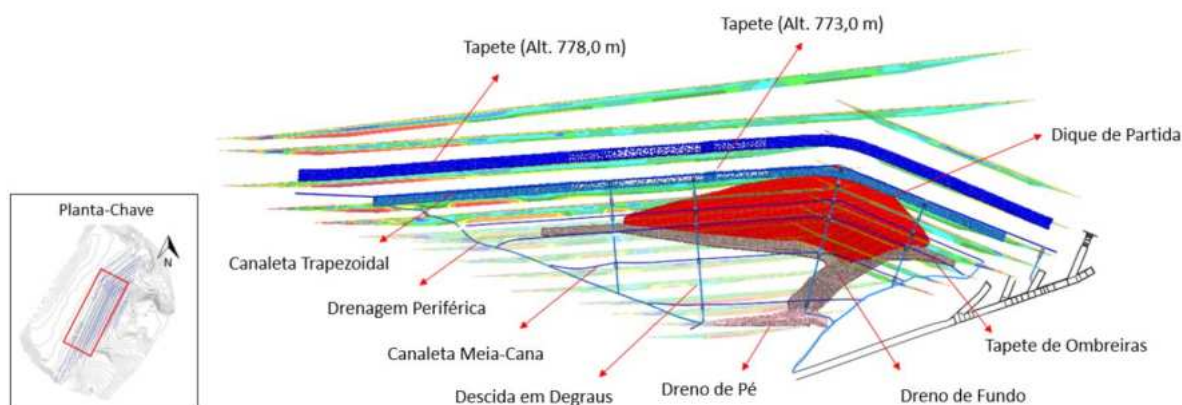


Figura 3: Estruturas do sistema de drenagem interna (2018). (fonte: Empresa que administra a barragem, relatório NGG-004-01-TX-2021-RT-00).

4.3. Interpretação geológico-geotécnica

As investigações executadas pela empresa que administra a estrutura, retiradas do relatório NGG-004-01-TX-2021-RT-00, concluem, de forma resumida, que as ombreiras apresentam uma cobertura coluvionar pouco espessa, às vezes com menos de 1 m de espessura, composta por argila siltosa, com pedregulhos, cor avermelhada, consistência média a rija, por vezes com presença de pedregulhos.

Sotoposto ao solo transportado ocorre um silte argiloso, também silto-arenoso, micáceo, às vezes grafitoso, com foliação marcante mergulhando entre 20 e 35° no

sentido da ombreira esquerda (NE), com consistência média a rija no trecho inicial (2 a 3 m), passando a dura em profundidade, produto de alteração de xistos e filitos.

A barragem é composta por areia fina, com menor quantidade de areia média (< 10%) e também certa fração de areia fina (10 a 15%). O SPT no maciço normalmente é superior a 10 golpes, enquanto que na praia os valores médios estão entre 3 e 7 golpes nos metros iniciais, aumentando com a profundidade.

4.4. Levantamentos geofísicos prévios

Em 2018 foi realizada uma análise integrada entre os métodos geofísicos de Caminhamento Elétrico, Polarização Induzida, Potencial Espontâneo e GPR. Isso permitiu a diferenciação entre os materiais constituintes do barramento, estruturas drenantes e realizar ponderações acerca de regiões com possíveis zonas de maior umidade.

Segundo dados fornecidos pela empresa que administra a estrutura, na eletrorresistividade (CE) foi possível diferenciar zonas de alta resistividade aparente (ZAR) que podem estar relacionadas ao terreno natural assim também como a fundação do maciço. Zonas de Baixa resistividade (ZBR) podem estar relacionadas a materiais cujos espaços entre os grãos estão preenchidos por água e/ou cuja composição é mais argilosa, enquanto valores intermediários (ZIR) podem estar relacionados a materiais antropicamente lançados e pertencentes ao maciço.

O estudo dos resultados obtidos pelo método do Potencial Espontâneo (SP) executado ao longo do barramento mostrou uma boa correlação com o método de Eletrorresistividade (CE). Regiões que apresentam variação de potencial elétrico bem como o adensamento de linhas de isovalores, sugerem um possível fluxo subsuperficial, direcionado de zonas com baixos potenciais para elevados potenciais e corroborado, muitas vezes, pelos resultados obtidos no método de Eletrorresistividade.

4.5. Histórico do monitoramento através da interferometria sísmica de ruído ambiente

Diante do histórico do monitoramento através da interferometria sísmica de ruído ambiente foi observada uma queda de 11% das variações de velocidade na interferometria sísmica do ruído ambiente (Figura 4). Parte dessa queda deve-se ao alto índice pluviométrico entre outubro de 2020 e abril de 2021, porém adicionalmente por ações operacionais na distribuição de rejeitos na praia da barragem de Catalão. Em trabalhos de campo feitos pela empresa que administra a barragem, observou-se que o espigotamento na Baía 5 gerou uma zona de atenção de possível umidade devido à queda da variação de velocidade em 11%. Espigotamento é uma operação rotineira de despejo de uma mistura de um material composto por aproximadamente 70% de fluido e 30% de sólido através de tubulações distribuídas em setores ao longo da crista da barragem para aumentar o tamanho da praia de rejeitos (Figura 5A). Neste caso, foi proposto que o excesso de água adicionada pelo espigotamento teve um fluxo inverso em direção ao maciço da barragem, gerando certo grau de infiltração e, junto a outros fatores, delimitou uma região de atenção na estrutura próxima ao geofone 4 na Baía 5 (Figura 5B).

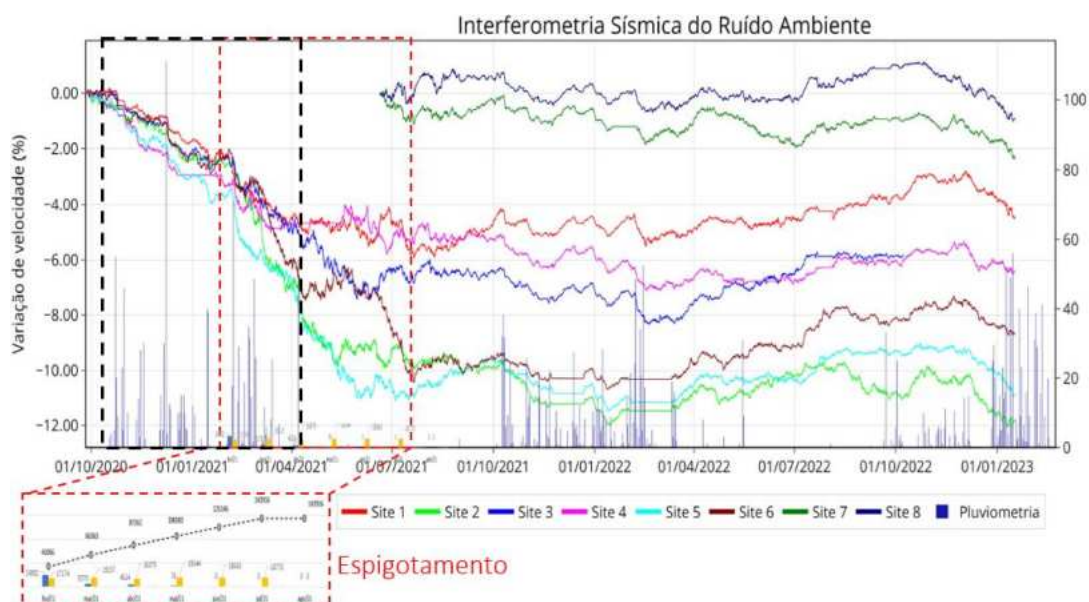


Figura 4: Curvas de variação de velocidade (%).

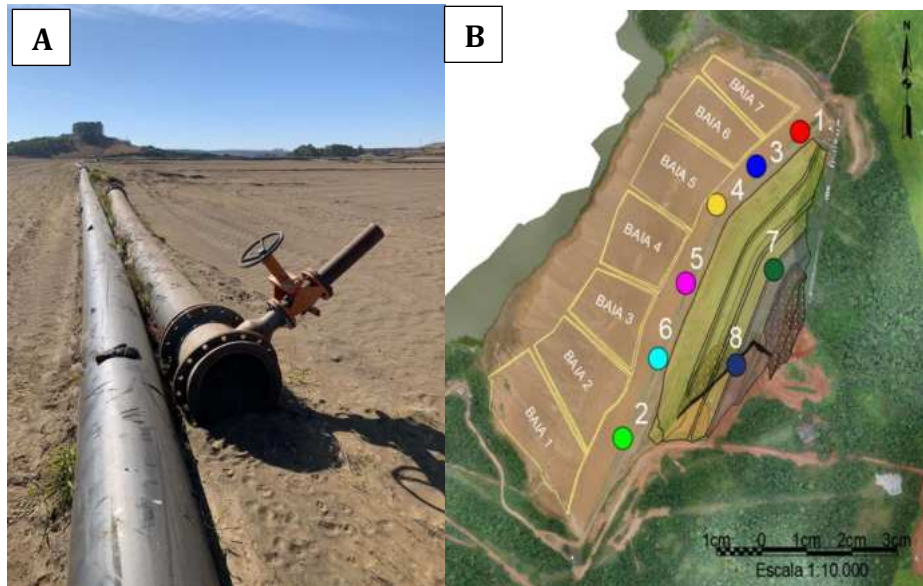


Figura 5: A) Imagem da tubulação de espigotamento na praia da barragem. B) Localização dos geofones da ANSI e baias de espigotamento.

Após essa queda de 11% da variação de V_s , foi solicitada a aquisição do MASW para medir a V_s no aterro da estrutura e a partir disso realizar o estudo das análises do comportamento desse parâmetro ao longo do tempo (Figura 6).

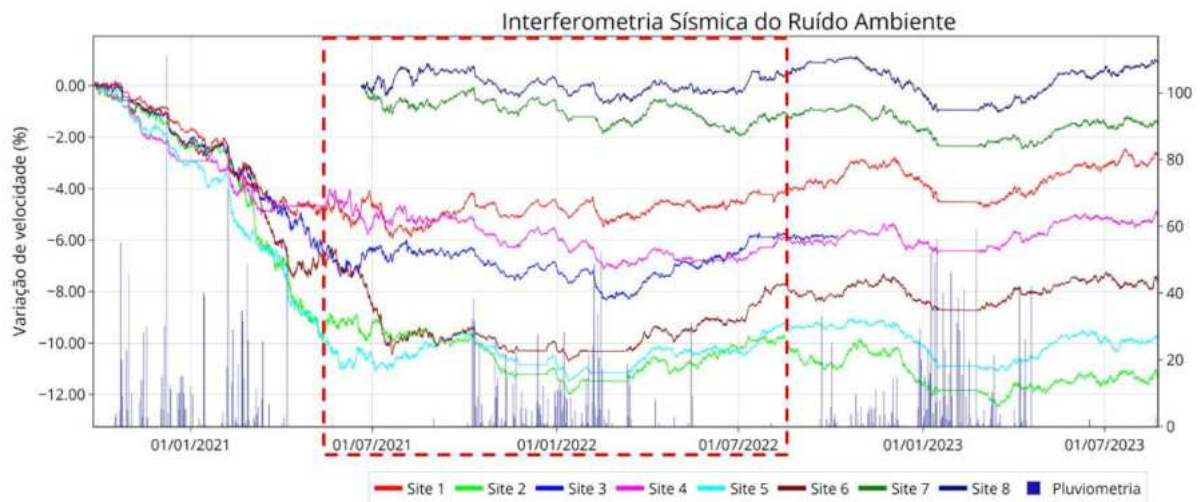


Figura 6: Curvas de variação de velocidade (%) entre o período de aquisição do MASW e as linhas calculadas a partir da ANSI. (Fonte: Empresa responsável pela barragem).

5. ONDAS

Antes de descrever os métodos utilizados neste trabalho, é importante compreender os princípios de propagação das ondas. Isso é essencial para a análise integrada que visa monitorar a integridade das estruturas utilizando tanto MASW quanto a interferometria sísmica do ruído ambiente. Ambos os métodos são fundamentados no comportamento das ondas S. Para explicar os conceitos de forma objetiva, seguem abaixo os principais tópicos abordando o tema (Halliday, D. 2002):

- 1) Onda: É um movimento causado por uma perturbação que se propaga através de um meio.
- 2) Ondas Eletromagnéticas: são ondas geradas por cargas elétricas oscilantes e sua propagação não depende do meio em que se encontram, podendo propagar-se no vácuo e em determinados meios materiais.
- 3) Ondas Mecânicas: são ondas que necessitam de um meio material para se propagar, ou seja, sua propagação envolve o transporte de energia cinética e potencial e depende da elasticidade do meio. Os diferentes tipos de ondas mecânicas são utilizados nos métodos geofísicos deste trabalho.
- 4) Classificação da propagação das ondas:
 - a) Unidirecionais: quando se propagam em uma única direção
 - b) Bidirecionais: quando se propagam por uma superfície
 - c) Tridimensionais: quando são capazes de se propagar em todas as dimensões
- 5) Classificação da direção da vibração das ondas:
 - a) Transversais: causadas por vibrações perpendiculares à propagação da onda, como, por exemplo, em uma corda.
 - b) Longitudinais: são ondas causadas por vibrações com mesma direção da propagação, como as ondas sonoras
 - c) Período: tempo necessário para completar um ciclo completo.
 - d) Frequência: número de repetições do ciclo em uma unidade de tempo. Dada pela fórmula onde $f=1/T$.

- e) Ondas Sísmicas: são perturbações elásticas que se propagam em resposta a fontes de energia ativas ou passivas.
- f) Ondas P: ou ondas compressoriais, são definidas pelo deslocamento das partículas ocorrer na mesma direção de propagação da onda.
- g) Ondas S: ondas de cisalhamento, são definidas pelo deslocamento das partículas transversalmente em relação a direção de propagação de onda.
- h) Ondas superficiais: são ondas que viajam próximo a superfície, caracterizadas pela baixa frequência, alta amplitude e longa duração, sendo subdivididas em:
 - i) Ondas Rayleigh: o movimento das partículas consiste em movimentos elípticos (geralmente elípticos retrógrados) no plano vertical e paralelo à direção de propagação, como mostrado na (Figura 7). A amplitude diminui com a profundidade.
 - j) Ondas Love: O movimento das partículas consiste em movimentos transversais alternados, sendo horizontal e perpendicular à direção de propagação (transversal). Caracterizada pela diminuição da amplitude de acordo com a profundidade. O material retorna à sua forma original após a passagem da onda.

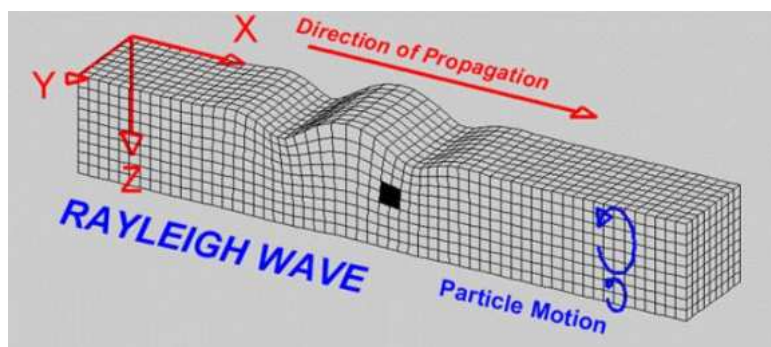


Figura 7: Representação das ondas Rayleigh.

6. METODOLOGIA

6.1. Interferometria Sísmica do ruído ambiente (ANSI)

Segundo Eaton et al. (2016), o termo “microssismo” se aplica a eventos com magnitudes variando de -2 a 0, incluindo o registro de eventos de magnitude superior a -2. Os princípios físicos dos sistemas de monitoramento microssísmico são os

mesmos aplicados em sistemas sísmicos tradicionais. A diferença entre as duas abordagens reside na sensibilidade do equipamento utilizado. Devido à alta sensibilidade do equipamento, é possível realizar análises usando tecnologia microssísmica (como o ruído ambiente). A classificação de eventos sísmicos com base em sua magnitude está apresentada na (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação de sismos de acordo com a escala de magnitude (Eaton et al., 2016).

Magnitude range	Class
8-10	Great earthquake
6-8	Large earthquake
4-6	Moderate earthquake
2-4	Small earthquake
0-2	Miliseism or microearthquake
-2 to 0	Microseism
-4 to -2	Nanoseism
-6 to -4	Picoseism
-8 to -6	Femtoseism

A microssísmica passiva, ou interferometria sísmica de ruído ambiente, registra a variação de velocidade de ondas S em um determinado meio. Essa técnica diferencia-se por possibilitar a aplicação do monitoramento contínuo e em tempo real dos parâmetros físicos das estruturas (Figura 8).

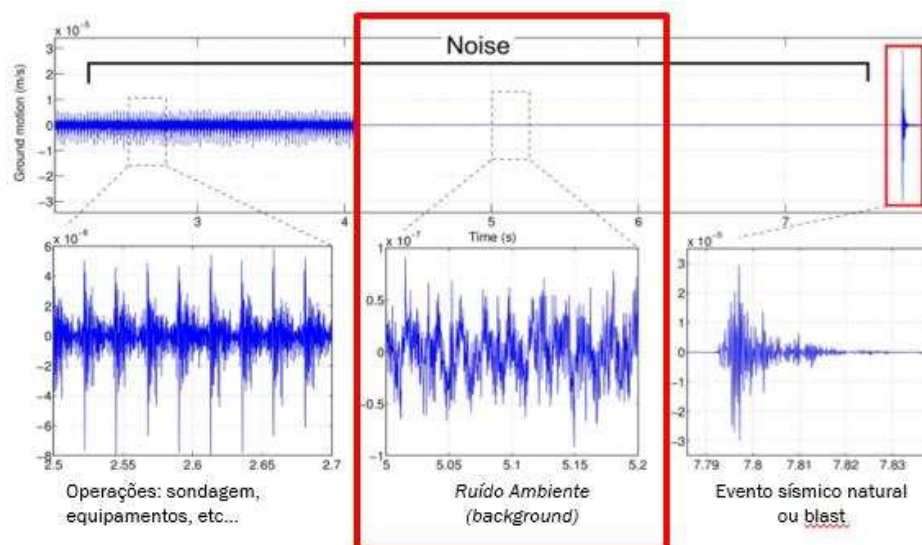


Figura 8: Assinatura sísmica da interferometria sísmica do ruído ambiente. Linha vermelha destacando o background da ANSI. (Adaptado de Olivier et al., 2015).

As variações de velocidade das ondas S podem ser correlacionadas a pequenas alterações nas propriedades físicas de determinado meio como: grau de compactação, porosidade, grau de fraturamento e a presença de água na estrutura.

Segundo Barros et al. (2012), as variações de V_s são associadas a baixas deformações no solo e são diretamente proporcionais ao módulo de cisalhamento máximo ou módulo de rigidez, pela seguinte equação:

$$G_{max} = \rho \times V_s^2$$

G_{max} = Módulo de cisalhamento ou rigidez

ρ = Massa específica do solo

V_s = Velocidade da onda cisalhante

Na estratégia do monitoramento através da ANSI, utilizamos este conceito como base para fundamentarmos as alterações internas as estruturas das barragens e dessa forma classificar possíveis riscos e tomadas de decisões para remediações de rompimentos. É importante salientar há relevância na comparação dos dados em um estudo sazonal com este método pois alguns fatores, como o índice pluviométrico, obras e operações na região influenciam diretamente nos dados dada a sensibilidade dos sensores.

O sistema de monitoramento através da interferometria sísmica do ruído ambiente ocorre a partir do pareamento de geofones e pela correlação cruzada dos sinais microssísmicos gerados pelo ruído ambiente (Figura 9), criando uma fonte virtual. A propagação de ondas elásticas em um espectro de frequência delimitado pode ser descrita cientificamente pela recuperação da função de Green, conforme delineado por Snieder R. (2006) (Figura 10). Estas ondas, devido à sua natureza dispersiva, permitem o mapeamento das heterogeneidades do meio.

A detecção destas ondas é realizada por meio de geofones triaxiais e/ou uniaxiais, que transmitem os sinais captados para um centro de armazenamento de dados remoto e processamento subsequente.

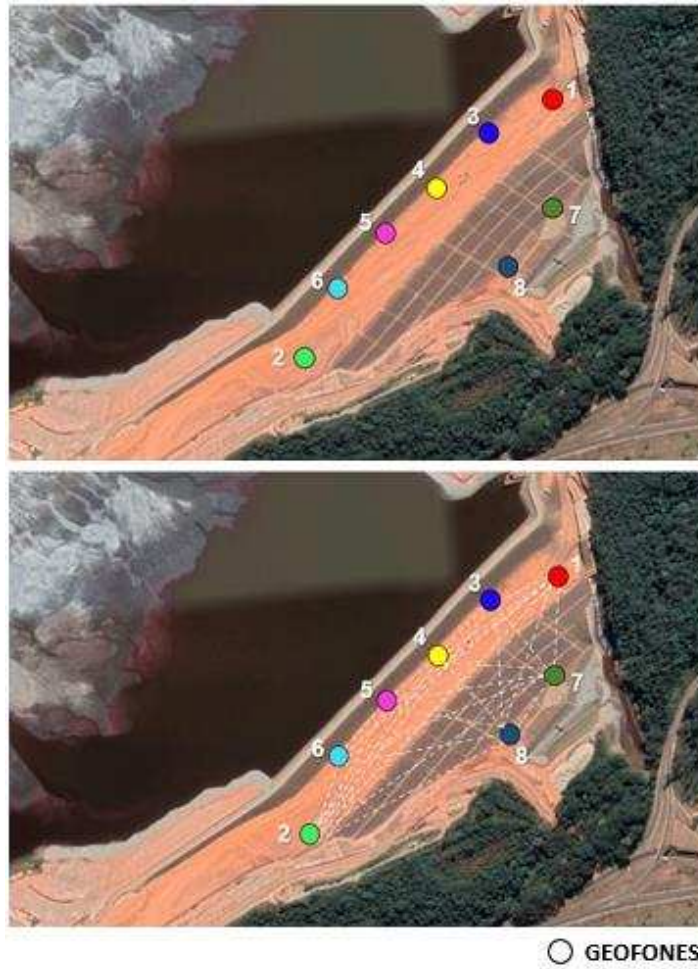


Figura 9: Esquemática do pareamento dos geofones. (Fonte: autora)

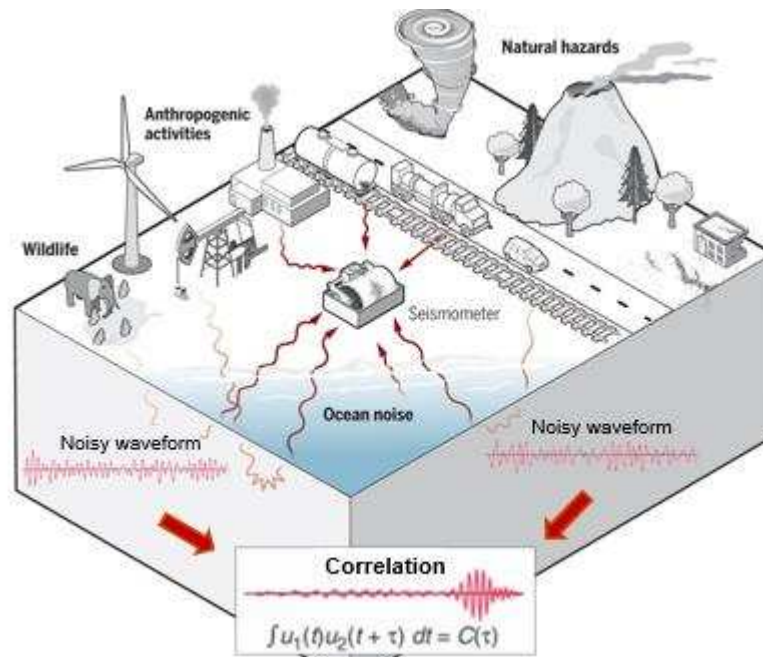


Figura 10: Esquema exemplificando o ruído ambiente e a correlação pela função de Green. (Snieder R., 2006)

Atualmente, o sistema de monitoramento microsísmico na barragem de Catalão conta com oito geofones, sendo seis uniaxiais e dois sensores triaxiais, dispostos ao longo da crista e a jusante da mesma, conectados a três estações sísmicas alimentadas por energia solar (Figura 11).

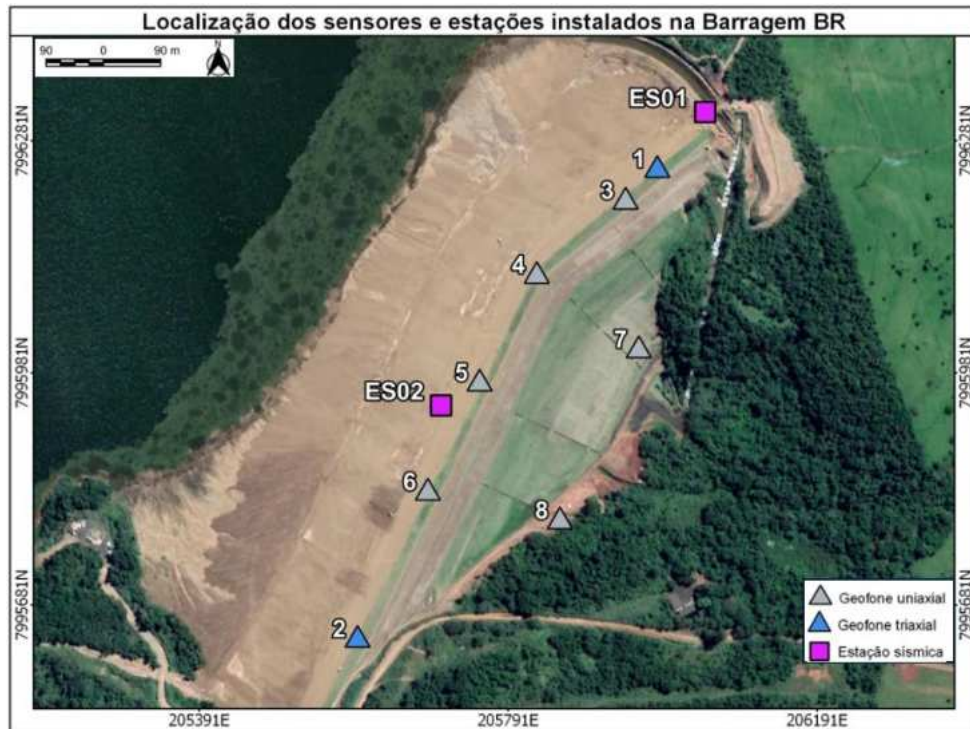


Figura 11: Mapa de localização dos geofones e das estações sísmicas do sistema de monitoramento microsísmico da Barragem BR (Fonte: autora).

6.2. Multichannel Analysis of Surface Waves

O método Multichannel Analysis of Surface Waves é uma técnica de análise espectral usada para gerar um modelo baseado nas variações das velocidades das ondas de cisalhamento (V_s) em função da profundidade no local investigado. O objetivo principal do MASW é caracterizar o solo bem como suas alterações físicas. Quando aplicados ao monitoramento de barragens, os resultados da aquisição de MASW são importantes para avaliar a integridade física das estruturas, identificando materiais pouco consolidados com valores de V_s mais baixos e rochas sãs com valores de V_s mais elevados, indicando níveis de rigidez das estruturas. Essa ferramenta é prática visto a aplicação em investigações não destrutivas, oferecendo dados relevantes para a compreensão das características do subsolo e das propriedades dos materiais em diversas aplicações geotécnicas.

O método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) foi proposto para calcular perfis da variação da velocidade da onda S (V_s) em profundidade a partir do

ground roll de um registro sísmico multicanal. O *ground roll* é um tipo particular de onda Rayleigh que viaja ao longo ou próximo à superfície do solo, geralmente caracterizada por velocidade relativamente pequena, baixa frequência e alta amplitude.

Em levantamentos sísmicos terrestres, quando uma fonte de onda de compressão é usada, grande parte da energia sísmica total é pertencente às ondas Rayleigh que são ondas superficiais que se propagam como frentes de onda cilíndricas na superfície. A transmissão da onda Rayleigh impõe às partículas próximas da superfície um movimento elíptico retrógrado restrito ao plano vertical que contém a direção de propagação (Barros *et al.*, 2012) e, por esta razão, possui características dispersivas e destrutivas quando comparada a outras ondas de superfície. Ademais, a propagação das ondas Rayleigh está relacionada a um intervalo restrito de 0,87 a 0,96Vs, resultando no potencial de utilização dessa onda para caracterização de Vs em subsuperfície (Barros *et al.*, 2012). Portanto, a dispersão das ondas Rayleigh, definida como a variação da velocidade de propagação com a frequência, está relacionada à variação da velocidade vertical em um meio. Assim, o método MASW fundamenta-se na determinação das velocidades de fase das ondas S em profundidade, onde em meios onde a velocidade aumenta com a profundidade, as ondas Rayleigh viajam mais rápido à medida que a frequência diminui. Isso permite calcular as velocidades de fase usando o MASW.

Segundo Barros *et al.* (2012) em meios com aumento da velocidade com a profundidade, a velocidade de propagação das ondas Rayleigh aumenta com a diminuição da frequência. Com base nesse conceito, o método MASW determina as velocidades de fase diretamente a partir de dados de onda de superfície de uma seção sísmica após aplicar a transformação integral aos dados no domínio da frequência. Essa integração converte os dados no domínio do tempo (tempo-distância) em uma imagem de frequência versus velocidade de fase (Figura 12).

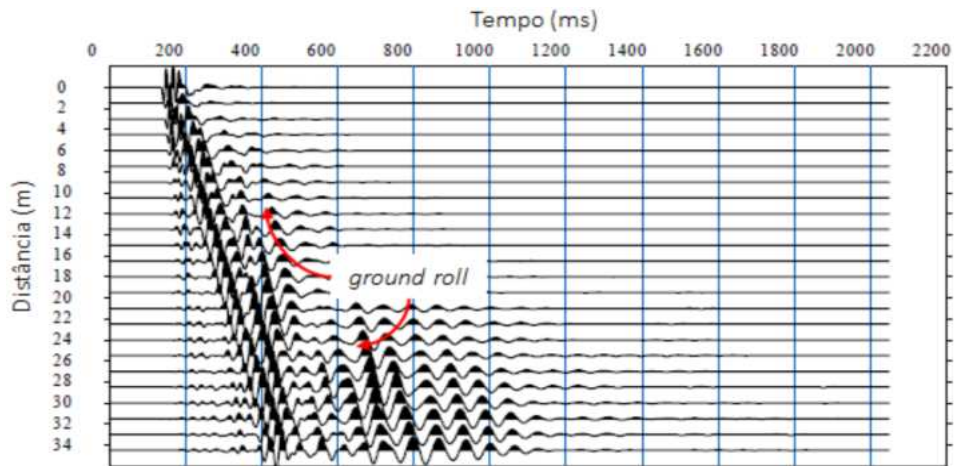


Figura 12: Exemplo de uma seção sísmica com registro do ground roll (onda Rayleigh). Fonte: adaptado de Hayashi (2008).

A determinação das velocidades das ondas é feita através da amplitude máxima em cada frequência, que irá diminuir exponencialmente com a profundidade, confinando-se a uma profundidade de aproximadamente um comprimento de onda de superfície.

Em um meio isotrópico e homogêneo, as propriedades do material não variam com a profundidade, e todas as frequências possuem a mesma velocidade de fase. No entanto, em um meio verticalmente heterogêneo, diferentes comprimentos de onda (ou frequências) amostram materiais com diferentes propriedades elásticas médias. Esse fenômeno é conhecido como dispersão. A curva de dispersão ilustra o comportamento dispersivo da onda Rayleigh, como mostrado na Figura 13.

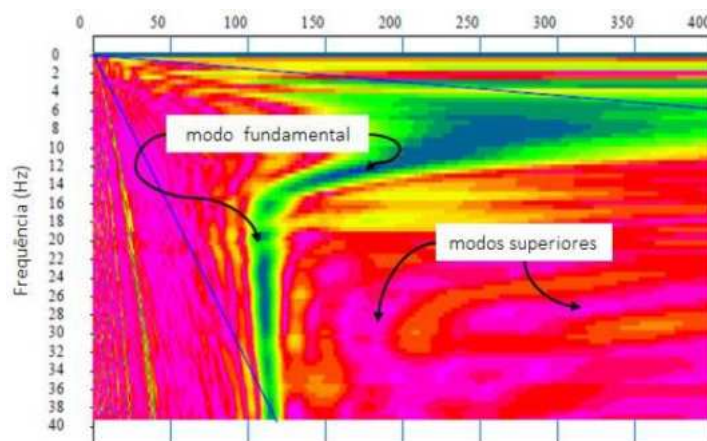


Figura 13: Transformação integral no domínio da frequência: imagem de velocidade de fase versus frequência. Fonte: adaptado de Hayashi (2008).

6.3. Aquisição do MASW

O procedimento de um ensaio MASW pode ser separado em três partes: aquisição, processamento e inversão (Barros et al., 2012) (Figura 14):

1. **Aquisição:** Realiza-se um ensaio semelhante ao de refração sísmica, gerando ondas sísmicas e registrando-as com um arranjo linear de geofones equidistantes. A fonte de impacto vertical (como uma marreta) gera as ondas, e os geofones verticais registram os dados.

2. **Processamento:** A curva de dispersão da onda Rayleigh é obtida a partir do sismograma registrado, transformando os sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa curva é encontrada buscando os máximos de energia no espectro de frequência.

3. **Inversão:** Utilizando a curva de dispersão selecionada, um modelo de subsuperfície é inferido, resultando em um perfil de velocidade da onda de cisalhamento (V_s) com a profundidade. A determinação desses parâmetros é iterativa, buscando minimizar a diferença entre a resposta teórica e a curva obtida em campo.

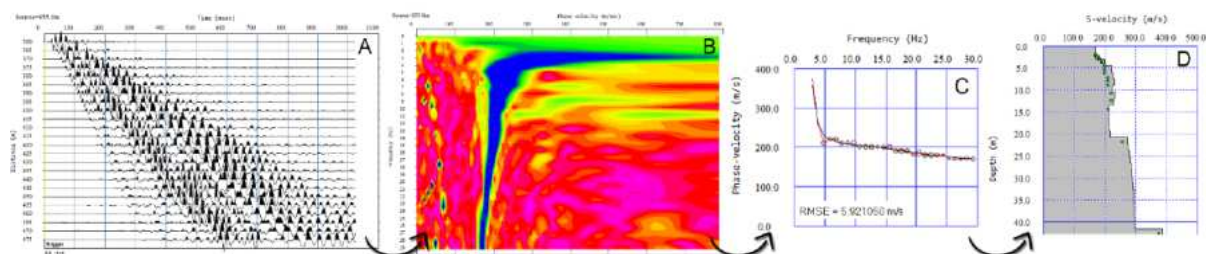


Figura 14: Fluxo de tratamento de dados. A) Seção sísmica no domínio do tempo; B) Transformação integral dos dados no domínio da frequência: imagem de velocidade de fase versus frequência e picks de velocidade associados ao modo fundamental de vibração; C) Inversão da curva de dispersão observada e encaixe de uma curva teórica calculada; D) Perfil calculado da variação de V_s em profundidade. Fonte: adaptado de Hayashi (2008).

A aquisição de dados MASW é bastante similar ao levantamento de sísmica de refração. Perfis retilíneos são formados por múltiplos geofones (geralmente 12 a 48) posicionados de forma equidistante uns dos outros. Quanto mais receptores são utilizados, maior a resolução da imagem de velocidade de fase versus frequência, aumentando a qualidade do processo de construção da curva de dispersão.

Em julho de 2021, um total de quatro perfis de dados sísmicos foram adquiridos a jusante da barragem (Figura 15). O sismógrafo multicanal modelo Geode (Geometrics ®) foi utilizado na aquisição dos registros de seções sísmicas com taxa

de amostragem de 4kHz e configurado para 1 segundo, totalizando 4.000 amostras por seção. O software Seismodule Controller (Geometrics ®), foi utilizado para o registro dos dados e configuração dos parâmetros de aquisição.

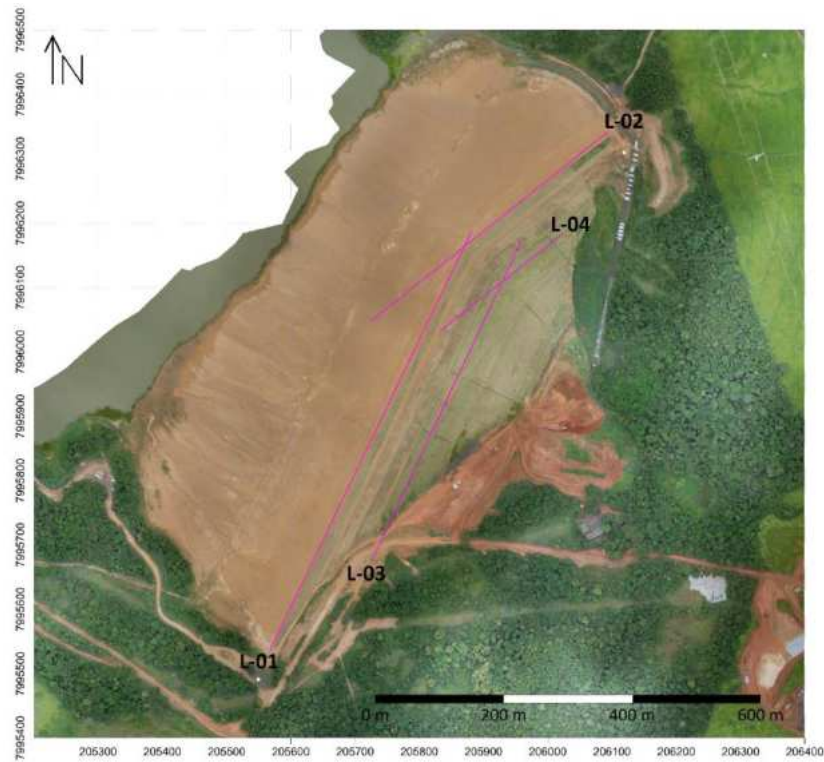


Figura 15: Mapa de localização da área de estudo com a distribuição dos quatro perfis de aquisição MASW. O número de identificação das linhas indica o início de cada perfil de aquisição de dados.



Figura 16: Fotos dos equipamentos da base de aquisição de dados. A) Um sismógrafo Geode de 24 canais para digitalização das formas de onda observadas por geofones; B) Um computador com software de aquisição de dados.

Para cada aquisição, 24 geofones verticais de 4,5 Hz foram utilizados, com um espaçamento de 5 m entre eles. O impacto de um *slide-sledge* (martelo) contra uma placa de ferro foi utilizado como fonte de energia sísmica. Os impactos foram sempre realizados a um *off-set* mínimo de 5 m. Para aumentar a razão sinal-ruído dos registros, o impacto foi repetido sete vezes, e a seção sísmica resultante para cada posição de fonte foi formada pelo empilhamento (soma) automático dos registros.

6.4. Determinação das áreas de menor velocidade de ondas da barragem (T0 e T1)

Os métodos de interferometria sísmica do ruído ambiente e análise multicanal de ondas de superfície provaram ser eficazes para entender os parâmetros físicos do solo tal como seu comportamento e integridade quando relacionado ao monitoramento da barragem (Rodrigues *et al.*, 2019). Para aplicar os resultados deste trabalho, foi utilizada uma nova técnica baseada nos princípios de ambas as metodologias. O objetivo dessa metodologia é integrar as técnicas para utilizar a compreensão de V_s , otimizando e, sempre que possível, fornecendo previsibilidade para as análises dos parâmetros físicos da estrutura, a partir dos padrões de comportamento de V_s . De maneira resumida, ao passo que o MASW é capaz de atribuir um valor definido para as velocidades de fase das ondas S na estrutura no momento da aquisição, já a interferometria sísmica do ruído ambiente é capaz de

obter o registro das variações das velocidades das ondas S no meio ao longo do tempo.

Neste estudo, apresentamos uma metodologia de integração entre os dois métodos, visando ampliar a capacidade de previsão do comportamento das ondas de superfície em determinado meio após um período de monitoramento determinado (T1). Esse resultado é proposto uma vez que obtemos a determinação da velocidade da onda na estrutura em um momento inicial (T0) e a partir dela podemos analisar o comportamento das variações das velocidades das ondas S por um período determinado. Dessa forma, após analisar as variações de velocidade das ondas s pela ANSI, é possível calcular as alterações desde a velocidade inicial (T0) para estimar a velocidade após um período determinado (T1). Além disso, ao estabelecer as velocidades de Vs estimadas na estrutura, é possível correlacionar áreas de influência de baixas velocidades em uma seção combinada (T0 + T1). As interpolações numéricas, análise de dados e seções deste trabalho foram geradas utilizando do software Leapfrog Geo (Copyright © 2024, Bentley Systems, Incorporated).

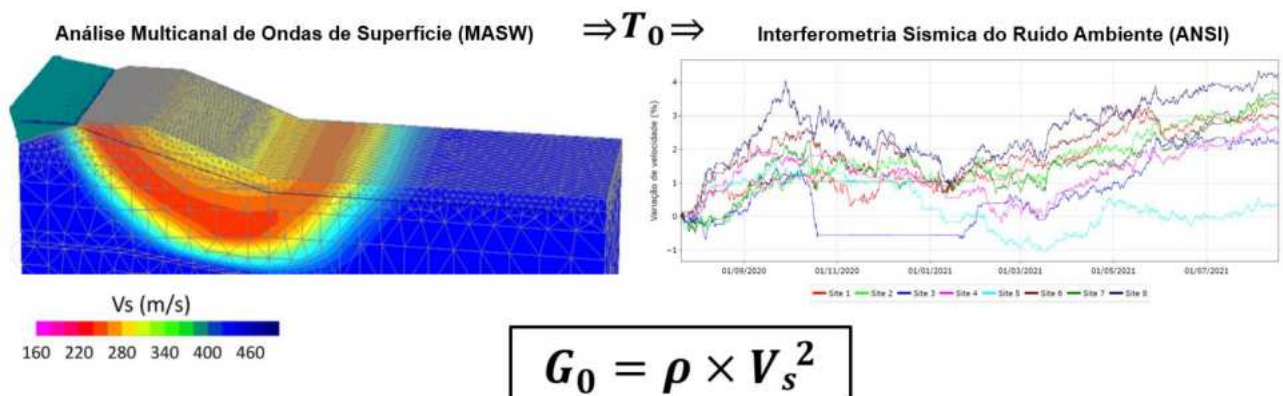


Figura 17: Representação da utilização dos dados de Vs como T0 e a ANSI como T1.
(Fonte: Empresa que administra a estrutura).

Para chegar aos resultados de T1 e T0 + T1 (seção combinada) e destacar as áreas de menor velocidade das ondas S na estrutura após um ano da aquisição do MASW (T0), foi feito um levantamento para quantificar as porcentagens do comportamento de aumento ou diminuição da variação das velocidades de cada geofone até Julho de 2022. Ao longo da L-01, os sensores da interferometria sísmica do ruído ambiente foram selecionados com base na respectiva proximidade em relação aos sensores utilizados para aquisição do MASW, com uma distância que pode variar entre 20 e 25 metros entre os pontos de aquisição (Figura 18).



Figura 18: Localização dos geofones utilizados para interferometria sísmica do ruído ambiente e localização dos pontos de aquisição do MASW.

Para gerar a linha de interpolação para T1, optou-se por estimar as variações de V_s de cada Geofone da interferometria sísmica do ruído ambiente plotando no mesmo ponto de aquisição de MASW selecionado para cada geofone, formando “pares” de acordo com as distâncias mencionadas acima, que foram selecionados de acordo com o Quadro 1 e a Figura 19:

Quadro 1: Pares de pontos de aquisição dos dados de MASW e da interferometria sísmica do ruído ambiente. As Letras A, B, C e D indicam a localização desses pares na L01 com a localização dos sensores correlacionados.

Ponto de aquisição do MASW		Geofone da ANSI
A)	L01-107	Geofone 2
B)	L01-116	Geofone 6
C)	L01-125	Geofone 5
D)	L01-131	Geofone 4

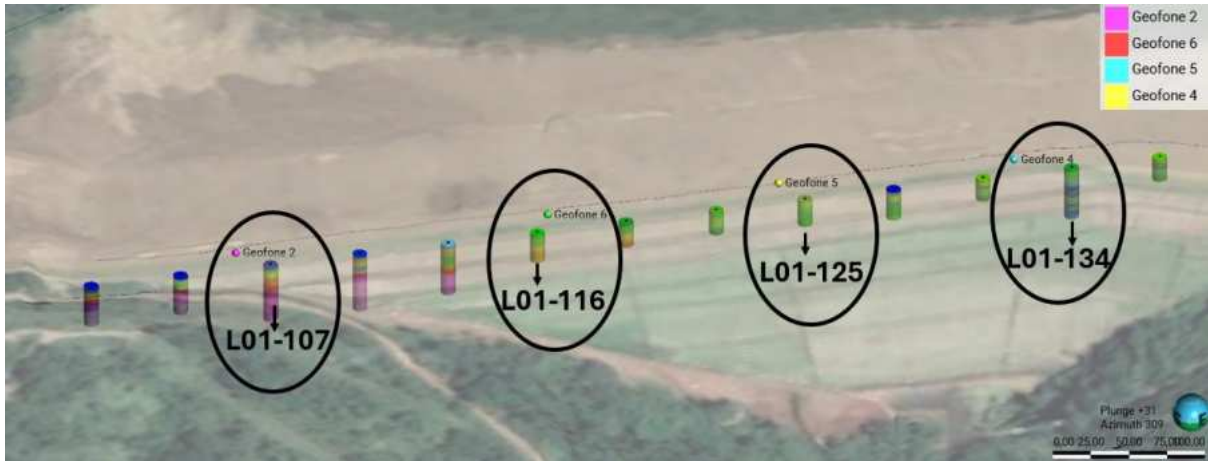


Figura 19: Círculos destacando a seleção dos geofones utilizados para correlação do MASW com a ANSI.

Para os resultados e discussões obtidos neste trabalho, a L-01 de MASW foi selecionada com base na proximidade com os geofones utilizados para o monitoramento contínuo da interferometria sísmica do ruído ambiente, exceto para o geofone 4, que foi correlacionado com a L01_134 com o objetivo de investigar melhor a zona de baixa velocidade destacada região do geofone 4 da ANSIA as distâncias entre os geofones da ANSI e o MASW ficam entre 20 e 25 metros e no caso do sensor 4 a distância é de aproximadamente 38 metros.

A partir dos dados de Vs em profundidade metro a metro, calculou-se as porcentagens de aumento ou diminuição da variação de Vs a partir do ponto inicial em T0 do MASW. Dessa forma, obtemos para cada sensor selecionado as linhas com as estimativas de Vs profundidade após 1 ano de aquisição do MASW.

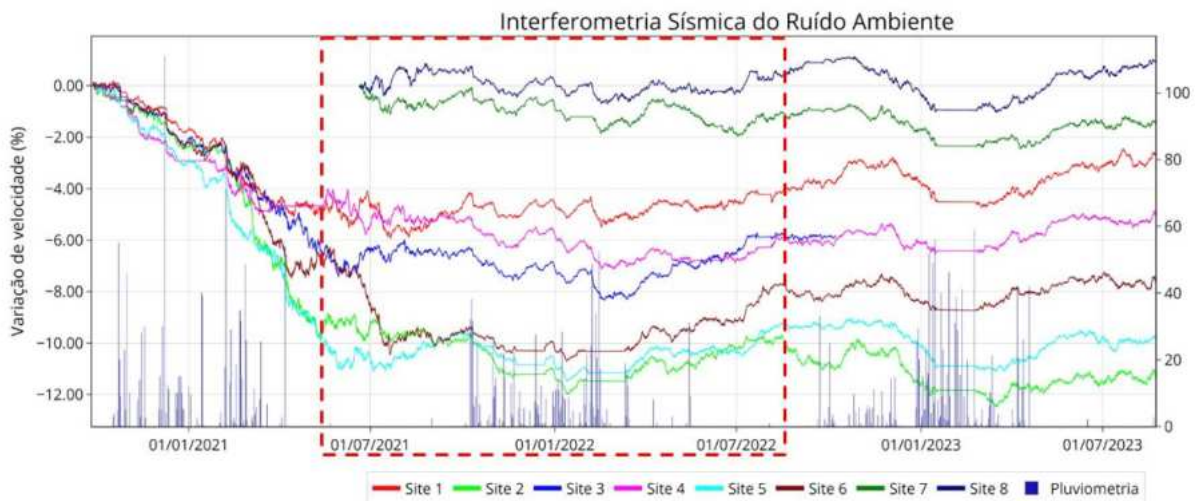


Figura 20: Curvas de variação de velocidade (%) entre o período de aquisição do MASW e as linhas calculadas a partir da ANSI. Tracejado vermelho: Tempo de monitoramento do estudo.

6.5. Ensaio de Piezocone (CPTU)

Como forma complementar para as investigações geotécnicas e a fim de possibilitar análises de comparação em relação ao nível d'água da estrutura, também iremos trabalhar com a campanha de investigações de CPTU distribuída ao longo do maciço, crista, ombreiras e pé da barragem BR de Catalão.

O ensaio de piezocone é um teste de penetração quasi-estática in situ que possibilita a identificação do perfil estratigráfico do terreno, além de fornecer uma avaliação preliminar dos parâmetros geotécnicos do solo (Lunne et al., 1997). Este procedimento é regulamentado pela norma ASTM D3441 (1986), tanto para o ensaio com medição de poro-pressões (CPTU), quanto para o ensaio sem essa medição (CPT).

Neste ensaio, uma ponta em forma de cone conectada à extremidade de um conjunto de hastes, é introduzida no solo a uma velocidade constante de 2 cm/s, equivalente a aproximadamente 1 m/min. O cone possui um ângulo de vértice de 60° e um diâmetro típico de 35,68 mm (correspondente a uma área de 10 cm²).

Os penetrômetros são equipados com células de carga que registram a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s). Os valores de poro-pressão (u) atrás do cone durante a penetração são determinados por meio de um transdutor de pressão.

A análise desses resultados, especialmente o valor da resistência de ponta corrigida (q_T) versus a razão de atrito ($R_f = q_T / f_s \times 100$), permite identificar o comportamento do solo para classificação. Além disso, com base nos valores medidos de q_c , f_s e u , é possível estimar os parâmetros de resistência, compressibilidade e permeabilidade do solo.

Uma informação relevante obtida com o ensaio de CPTU é o registro das poro-pressões (u). Com base nesses registros, é possível identificar as pressões de fluido no solo em profundidade e assim determinar uma linha de poro-pressão hidrostática, indicando um comportamento drenado, o que permite identificar o nível do lençol freático.

No total, foram utilizados 21 penetrômetros na barragem de Catalão localizados ao longo da praia de rejeitos, crista, ombreiras e pé, como observado na Figura 21. A data de aquisição é referente ao mês de julho de 2021. Devido a problemas nos equipamentos no momento da aquisição, não há dados referentes ao CPTU-3, CPTU-13, CPTU-18, CPTU-19, CPTU-20. Neste trabalho os resultados

serão utilizados para determinar o comportamento drenado do solo e comparar com o modelo de nível d'água da estrutura. Além disso, os ensaios ao longo da crista do CPTU-7, CPTU-10, CPTU-2 e CPTU-5 (Figura 22) serão comparados aos resultados de T1 e T0 do MASW através da ferramenta de combinação de furos do software Leapfrog Geo (Copyright © 2024, Bentley Systems, Incorporated).

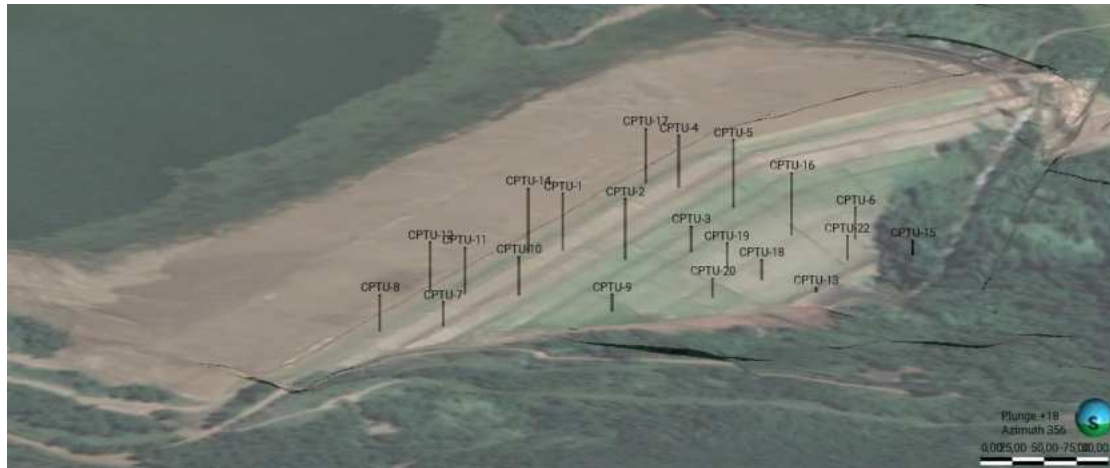


Figura 21: Localização dos ensaios de piezocone distribuídos na estrutura.



Figura 22: Localização dos ensaios de piezocone distribuídos ao longo da L01 de MASW em T0.

6.6. Indicadores de Nível d'água (INAs)

A criação de um modelo tridimensional (3D) do nível d'água é essencial para o monitoramento de barragens de rejeitos. Este modelo facilita a previsão de comportamentos hidráulicos, como infiltrações e erosões, contribuindo para a gestão

de riscos ao identificar e quantificar ameaças associadas ao armazenamento de rejeitos. A integração de dados em um modelo 3D é importante para a detecção precoce de anomalias e na tomada de decisão para ações de remediação.

Os pontos de aquisição dos indicadores de nível d'água ao longo da estrutura, observados na Figura 23, serão utilizados para gerar dois modelos 3D de visualização do nível freático, o primeiro em Julho de 2021 referente a T0, e outro em Julho de 2022 referente a T1. Ao todo foram utilizados 28 instrumentos distribuídos ao longo da crista, ombreiras, maciço e pé da barragem. O modelo foi feito utilizando o interpolador de erosão do software Leapfrog Geo.



Figura 23: Localização dos indicadores de nível d'água na barragem.

7. RESULTADOS

7.1. Índice Pluviométrico

Durante o período 12 meses de monitoramento desde a aquisição dos dados de MASW, o índice pluviométrico total entre julho de 2021 a julho 2022 foi de 915 mm, onde os meses com presença de chuvas iniciaram em outubro e se estenderam até maio do ano seguinte, como mostrado no gráfico abaixo. Em 2021, não houve registros significativos de chuva nos meses de julho, agosto e setembro. Já em outubro, novembro e dezembro a quantidade de chuva em milímetros registrada respectivamente em, 184, 135 e 85 mm. Já em 2022, os registros para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio em milímetros são de 151, 251, 52, 13 e 41mm. Entre junho e julho não há registros significativos de pluviometria (Figura 24).

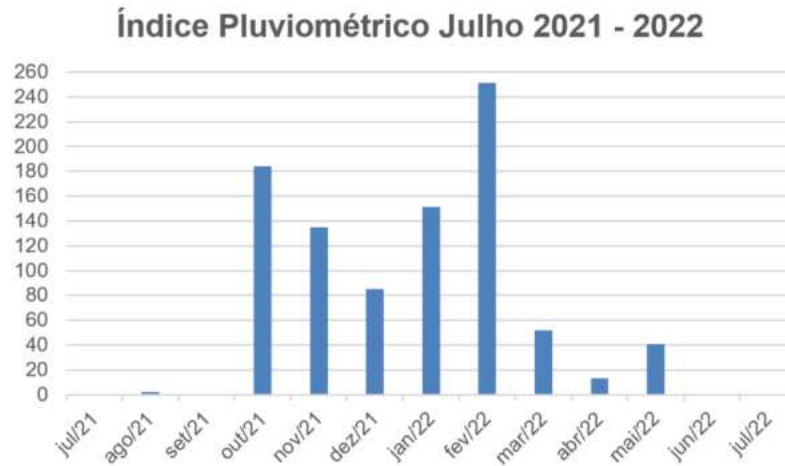


Figura 24: Índice Pluviométrico em Catalão (Go) entre julho de 2021 e 2022. (Dados provenientes da empresa contratante).

7.2. Modelos 1D e 2D de MASW em T0

Após a aquisição, processamento e Inversão dos dados de MASW utilizando a curva de dispersão selecionada para L01, um modelo de subsuperfície é inferido, resultando em um perfil de velocidade da onda de cisalhamento (V_s) com a profundidade (Figura 25). A determinação desses parâmetros busca minimizar a diferença entre a resposta teórica e a curva obtida em campo. Isso significa que os parâmetros que descrevem as propriedades do solo ou do substrato são ajustados repetidamente por um algoritmo de inversão até que a curva teórica, calculada com base nesses parâmetros, se alinhe o mais próximo possível com a curva de dispersão das ondas de superfície que foi realmente medida durante o levantamento de campo.

O modelo unidimensional de velocidade da onda S, derivados da inversão das curvas de dispersão utilizando o método MASW apresentado decorre dos pontos de aquisição da L01: 101, 104, 104. 1120, 113, 116, 119, 122, 125, 128, 131, 134 e 137. Para assegurar a precisão na interpolação e na construção de uma seção 2D, bem como evitar distorções devido à ausência de dados em algumas áreas, os perfis foram limitados a uma profundidade máxima de 20 metros.

As figuras subsequentes ilustram os perfis 1D da variação da velocidade da onda S (V_s) em profundidade. A linha L-01 exibe valores variando entre 164 m/s e 478 m/s, sendo as maiores velocidades observadas na ombreira direita e as menores no meio do maciço.

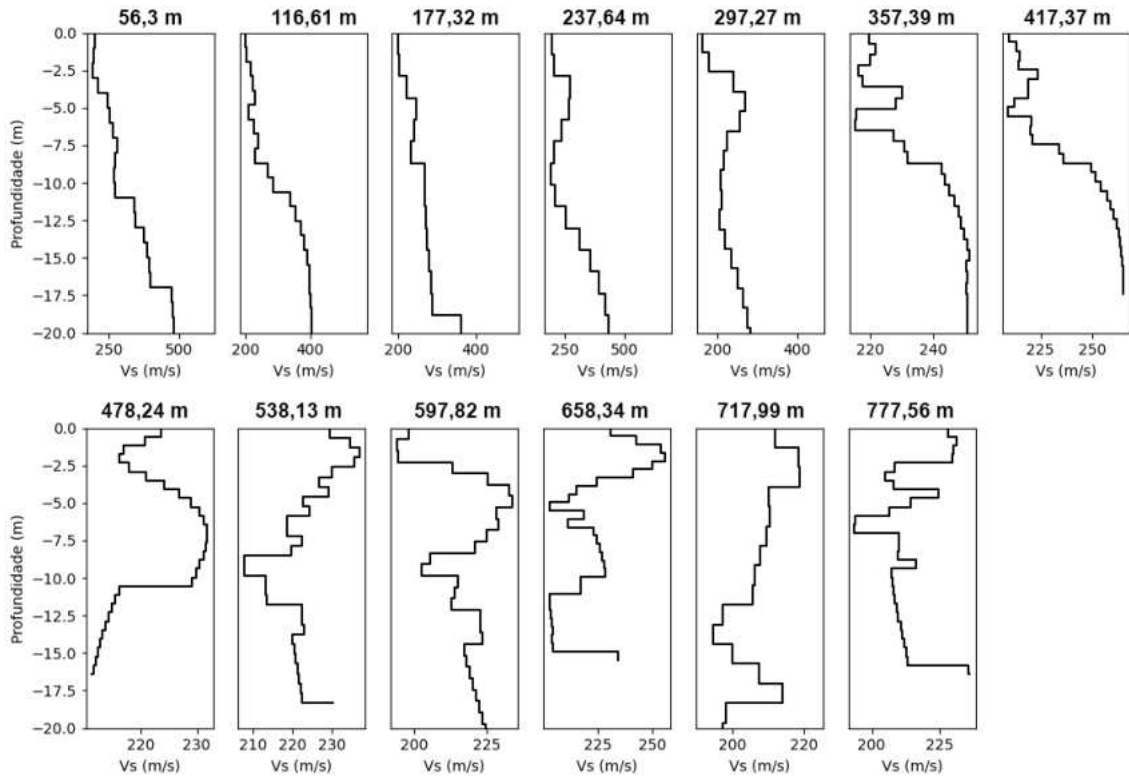


Figura 25: Perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos na linha L-01.

Uma interpolação de dados de onda S em modelos bidimensionais (2D) foi feita para criar uma representação contínua e detalhada das variações das propriedades do substrato ao longo da seção L01 (Figura 26 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Essa interpolação permite visualizar uma transição suave entre os pontos de dados individuais, gerando uma imagem clara e contínua das variações das velocidades das ondas S na estrutura. Isso facilita a interpretação dos dados e a identificação de zonas de interesse, que neste caso são as zonas de baixa velocidade. Além disso, com uma seção 2D interpolada, é possível identificar anomalias e padrões que podem não ser evidentes em perfis unidimensionais isolados (Figura 27).

A interpretação visual da interpolação na L01 ocorre através da escala de cores obtida por meio das maiores e menores Vs no modelo 2D apresentado. As cores frias indicam as maiores velocidades e as cores quentes menores velocidades, sendo os valores mínimo e máximo respectivamente 153 e 468 m/s. A ombreira direita possui uma zona de velocidade na cor magenta entre 320 e 468 m/s, próximo ao sensor 2, em uma profundidade entre 767m até o final da linha interpolada em

aproximadamente 730m. Acima dessa zona de maiores Vs, observa-se uma zona de transição de aproximadamente 10 metros até a superfície da crista com Vs variando entre 313 e 203 m/s entre a cota 767 e 777. No centro do maciço, próximo ao sensor 6, nota-se um gradiente de velocidade que dm maiores profundidade chega a 313 m/s e na menor profundidade o mínimo observado é de 208 m/s. Entre o sensor 5 e 4 a maior velocidade medida é de 258 em laranja e a menor velocidade de 198 m/s em azul na parte superior da seção. Logo abaixo ao Sensor 4 observa-se apenas zonas de velocidade abaixo de 213 m/s, destacando a ocorrência de 4 zonas de velocidade de cor azul entre 198 a 203 m/s em respectivas profundidades de 10m, 18m e 30m a partir da superfície.



Figura 26: Localização da L01 na barragem. Localização dos Sensores de 2, 6, 5 e 4.

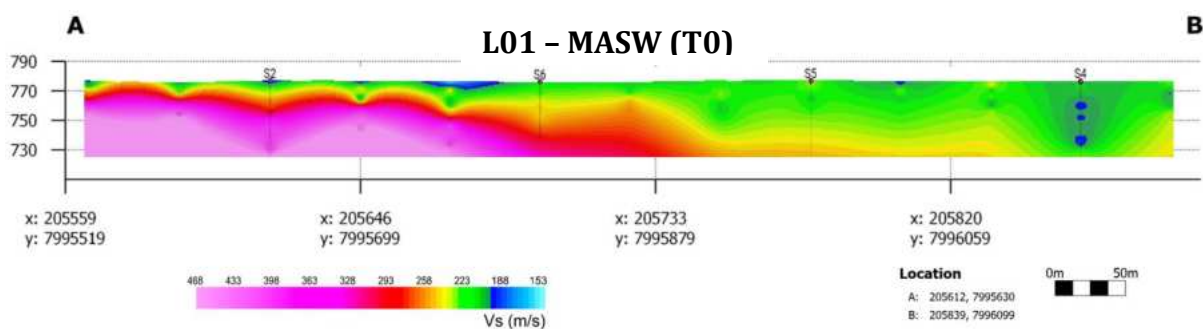


Figura 27: Seção A-B referente a interpolação 2D da L01 de MASW (T0); além do posicionamento dos Sensores 2, 6, 5 e 4 ao longo da linha.

7.3. Análises de variações de velocidade

A maior diminuição de variação de Vs observada no período de monitoramento foi de cerca de -1%, no geofone 4, seguida por -0,35% no geofone 6 e -0,25% no geofone 2. Ressalta-se ainda que o único geofone que mostra uma tendência de aumento, de aproximadamente 0,50%, é o geofone 5 (Figura 28).

Também estão apresentados os gráficos das variações na velocidade da onda S ao longo do período de estudo até julho de 2022, com destaque para os geofones utilizados no monitoramento indicado nas imagens. A partir de valores aproximados, verificou-se que, no sensor 2

Figura 29A), a variação mínima foi de $\pm 0,25\%$, enquanto a máxima alcançou -2,5%. Em julho de 2022 a variação de Vs no S2 apresentou uma tendência de queda de 0,25%. No sensor 6 (

Figura 29B), a variação mínima foi de $\pm 0,25\%$, enquanto a máxima atingiu -1,25%. Já, ao final do período de estudo, observou-se uma variação em cerca de -0,35%. No sensor 5 (

Figura 29C), a variação mínima observada foi de $\pm 0,25\%$ e a máxima de +0,50%, com essas mesmas variações sendo registradas ao final do período de estudo. No sensor 4 (

Figura 29D), a variação mínima observada foi de $\pm 0,25\%$ e a máxima de -1%, evidenciando uma tendência de queda ao longo do período de monitoramento. Apesar das flutuações, este sensor registrou a maior queda da variação de Vs entre os sensores, totalizando aproximadamente 1%.

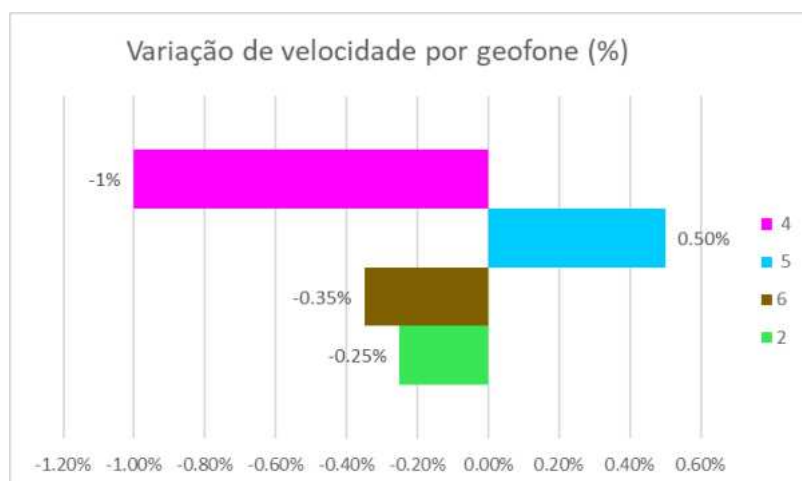


Figura 28: Variação de velocidade de cada geofone em julho 2022.

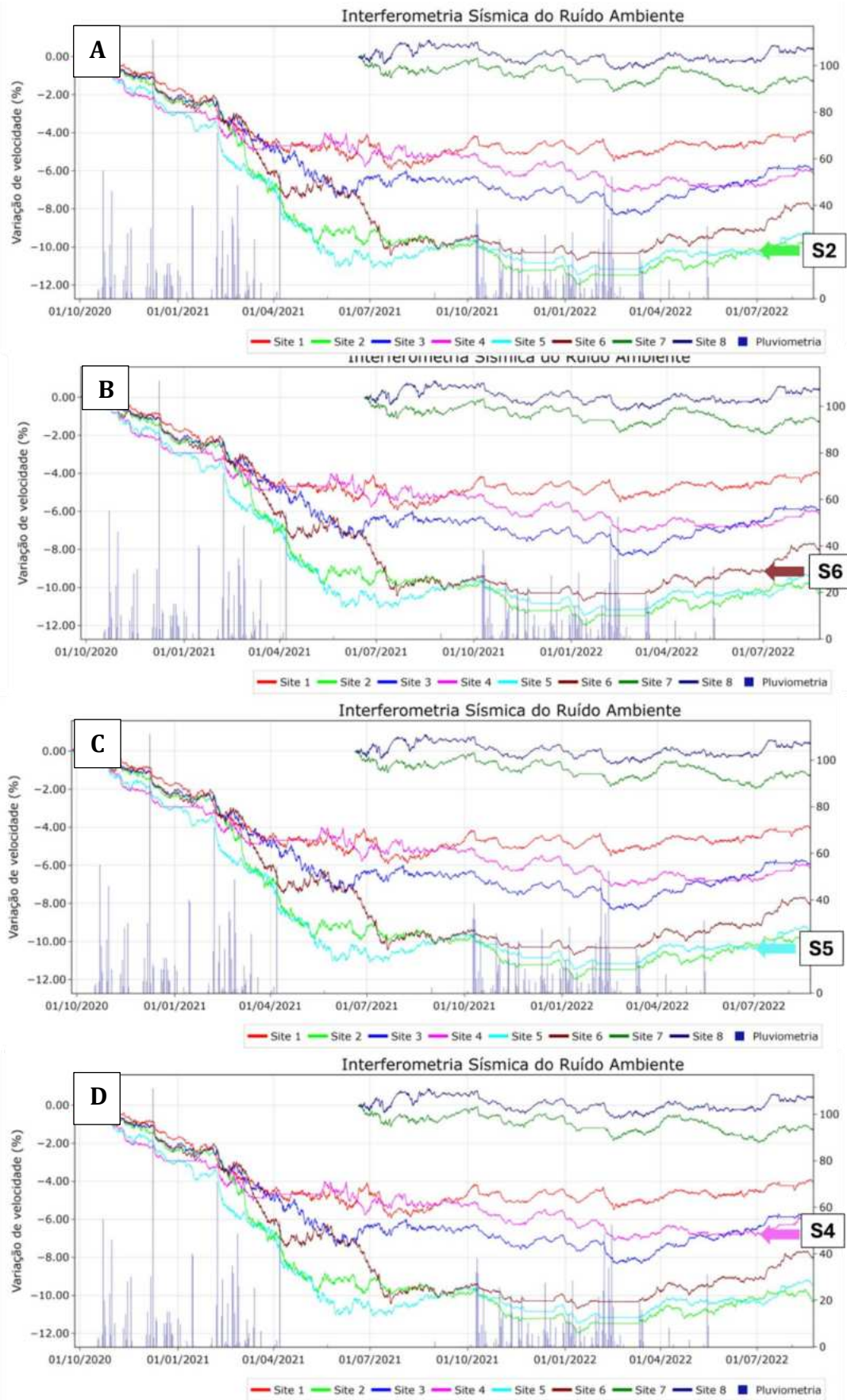


Figura 29: Gráficos correspondentes a variação de velocidade durante julho de 2021 e 2022. A=S2; B; S6; C=S5; D=S4.

A partir das variações de velocidade observadas nos quatro geofones ao longo de um ano, foi possível calcular as velocidades estimadas utilizando o Método de Análise Multicanal das Ondas de Superfície (MASW) como T0. Essas velocidades foram registradas ao longo da linha de crista, em relação aos sensores 2, 6, 5 e 4 respectivamente, após um ano de monitoramento (T1). Os dados resultantes estão sintetizados na Tabela 1: Variação Vs em profundidade de acordo com com geofone. A- Geofone 2; B- Geofone 6; C- Geofone 5; D- Geofone 4 correspondente utilizando as respectivas variações de Vs positivas ou negativas durante o período do monitoramento.

Com base nas novas velocidades de onda de cisalhamento (Vs) calculadas, é possível realizar uma comparação detalhada entre as velocidades registradas em T0 (início do monitoramento) e T1 (após um ano de monitoramento) para cada geofone. Essa comparação pode ser representada graficamente, utilizando uma mesma escala de cor aplicada a visualização dos dados de MASW, o que permite a identificação clara e precisa de áreas com mudanças significativas nas velocidades ao longo do tempo.

Tabela 1: Variação Vs em profundidade de acordo com com geofone. A- Geofone 2; B- Geofone 6;
C- Geofone 5; D- Geofone 4.

A	Geofone 2 - L01_107				B	Geofone 6 - L01_116			
	Profundidade		Variação de Vs -0.25 %			Profundidade		Variação de Vs -0.35 %	
	From	To	MASW (T0)	T1 (ANSI)		From	To	MASW (T0)	T1 (ANSI)
0.00	1.45	200.18	199.68	0.00	0.72	219.91	219.14		
1.45	2.90	203.16	202.65	0.72	1.45	221.61	220.83		
2.90	4.34	221.60	221.05	1.45	2.17	219.95	219.18		
4.34	5.79	246.68	246.06	2.17	2.90	216.57	215.81		
5.79	7.24	242.83	242.22	2.90	3.62	217.63	216.87		
7.24	8.69	232.56	231.98	3.62	4.34	230.01	229.20		
8.69	10.14	268.89	268.22	4.34	5.07	228.17	227.38		
10.14	11.59	268.80	268.13	5.07	5.79	215.88	215.12		
11.59	13.03	271.07	270.39	5.79	6.52	215.51	214.76		
13.03	14.48	275.28	274.59	6.52	7.24	227.43	226.64		
14.48	15.93	280.38	279.68	7.24	7.97	230.95	230.14		
15.93	17.38	284.66	283.95	7.97	8.69	231.79	230.98		
17.38	18.83	288.19	287.47	8.69	9.41	242.66	241.81		
18.83	20.28	361.38	360.48	9.41	10.14	243.71	242.86		
20.28	21.72	362.93	362.03	10.14	10.86	245.08	244.22		
21.72	23.17	363.81	362.90	10.86	11.59	246.47	245.61		
23.17	24.62	390.09	389.12	11.59	12.31	247.89	247.02		
24.62	26.07	390.29	389.32	12.31	13.03	248.74	247.87		
26.07	27.52	390.83	389.85	13.03	13.76	249.62	248.75		
27.52	28.97	391.45	390.47	13.76	14.48	250.53	249.65		
28.97	30.41	391.48	390.50	14.48	15.21	251.25	250.37		
30.41	31.86	392.43	391.45	15.21	15.93	250.26	249.38		
31.86	33.31	393.18	392.19	15.93	16.66	250.51	249.63		
33.31	34.76	393.73	392.75	16.66	17.38	250.39	249.51		
34.76	36.21	394.21	393.22	17.38	18.10	250.72	249.84		
36.21	37.66	394.83	393.84	18.10	18.83	250.76	249.88		
37.66	39.10	395.50	394.51	18.83	19.55	250.61	249.73		
39.10	40.55	396.52	395.53	19.55	20.28	250.51	249.64		
40.55	42.00	496.67	495.43	20.28	21.00	251.84	250.96		

C	Geofone 5 - L01_125			
	Profundidade		Variação de Vs +0.50 %	
	From	To	MASW (T0)	T1 (ANSI)
0.00	0.66	229.44	230.58	
0.66	1.31	234.44	235.61	
1.31	1.97	237.00	238.18	
1.97	2.62	235.70	236.88	
2.62	3.28	229.91	231.06	
3.28	3.93	226.68	227.81	
3.93	4.59	229.06	230.21	
4.59	5.24	222.63	223.74	
5.24	5.90	224.19	225.32	
5.90	6.55	218.67	219.76	
6.55	7.21	218.46	219.56	
7.21	7.86	222.49	223.60	
7.86	8.52	219.78	220.88	
8.52	9.17	207.69	208.73	
9.17	9.83	207.71	208.75	
9.83	10.48	213.19	214.25	
10.48	11.14	213.24	214.31	
11.14	11.79	213.54	214.61	
11.79	12.45	222.30	223.41	
12.45	13.10	222.38	223.50	
13.10	13.76	222.94	224.05	
13.76	14.41	219.83	220.93	
14.41	15.07	220.42	221.52	
15.07	15.72	220.73	221.83	
15.72	16.38	221.35	222.46	
16.38	17.03	221.57	222.68	
17.03	17.69	222.00	223.11	
17.69	18.34	222.46	223.58	
18.34	19.00	230.23	231.38	
19.00	20.00	237.00	238.18	

D	Geofone 4 - L01_134			
	Profundidade		Variação de Vs -1 %	
	From	To	MASW (T0)	T1 (ANSI)
0.00	1.31	211.89	209.77	
1.31	2.62	218.66	216.47	
2.62	3.93	218.77	216.58	
3.93	5.24	210.04	207.94	
5.24	6.55	210.56	208.45	
6.55	7.86	209.52	207.43	
7.86	9.17	207.76	205.68	
9.17	10.48	206.20	204.14	
10.48	11.79	205.72	203.66	
11.79	13.10	197.17	195.20	
13.10	14.41	194.57	192.62	
14.41	15.72	200.03	198.03	
15.72	17.03	207.48	205.41	
17.03	18.34	213.93	211.79	
18.34	19.66	198.17	196.19	
19.66	20.97	197.34	195.36	
20.97	22.28	203.39	201.36	
22.28	23.59	206.82	204.75	
23.59	24.90	205.83	203.77	
24.90	26.21	203.87	201.83	
26.21	27.52	202.99	200.96	
27.52	28.83	204.62	202.57	
28.83	30.14	205.26	203.21	
30.14	31.45	203.94	201.90	
31.45	32.76	198.45	196.47	
32.76	34.07	191.28	189.37	
34.07	35.38	193.28	191.35	
35.38	36.69	191.80	189.88	
36.69	38.00	223.89	221.65	
20.00	21.00	255.54	252.98	

7.4. Modelo 1D de MASW em T1

A partir das Vs estimadas para T1 (Tabela 1), foi possível inferir um perfil de velocidade de ondas de cisalhamento de acordo com a profundidade para cada linha de MASW correspondente aos sensores 2, 6, 5 e 4. Dessa forma, presume-se qual seria a curva de dispersão das ondas de superfície em campo no caso da medição de Vs.

Dessa forma, o modelo unidimensional de velocidade da onda S apresentado decorre dos pontos de aquisição correspondentes L01_107, L01-116, L01-125 e L01-131 aos sensores 2, 6, 5 e 4. Os perfis foram construídos com base na profundidade máxima correspondente a cada ponto de correlação, sendo de aproximadamente 40m para S2 e S4; e 20m em S6 e S5.

A figura subsequente ilustra os perfis 1D da variação da velocidade da onda S (V_s) em profundidade para T1. As linhas exibem valores que variam entre 189 m/s e 350 m/s, sendo as maiores velocidades observadas no perfil do sensor 2 e as menores no perfil referente ao sensor 4.

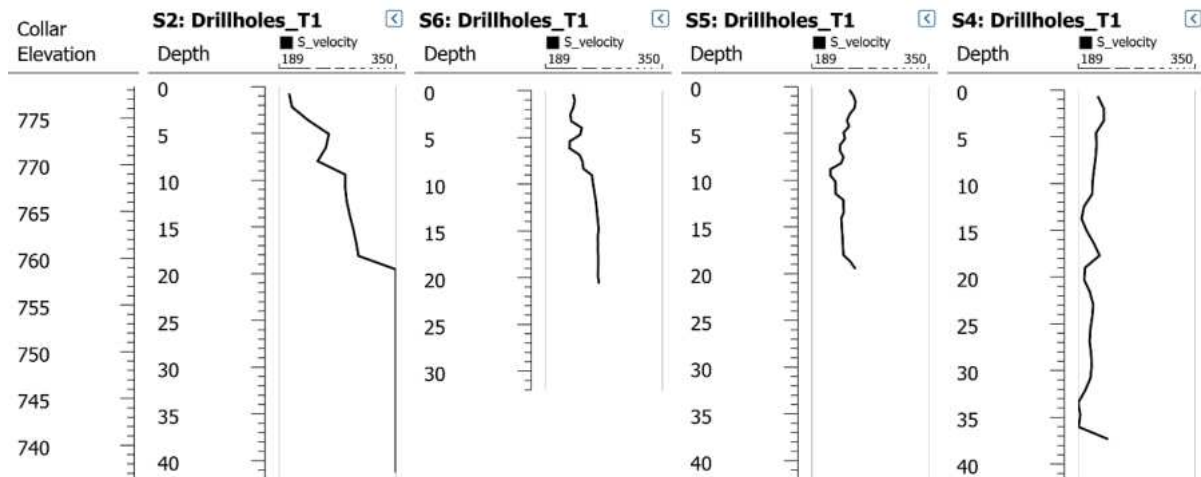


Figura 30: Perfis 1D da variação de V_s em profundidade obtidos em T1 para o geofone 2 (S2), geofone 6 (S6), geofone 5(S5) e geofone 4 (S4) respectivamente.

Na Figura 31 estão representados os resultados pontuais calculados para T1 localizados no S2 (L01-107), S6 (L01-116), S5 (L01-125) e S4 (L01-116).

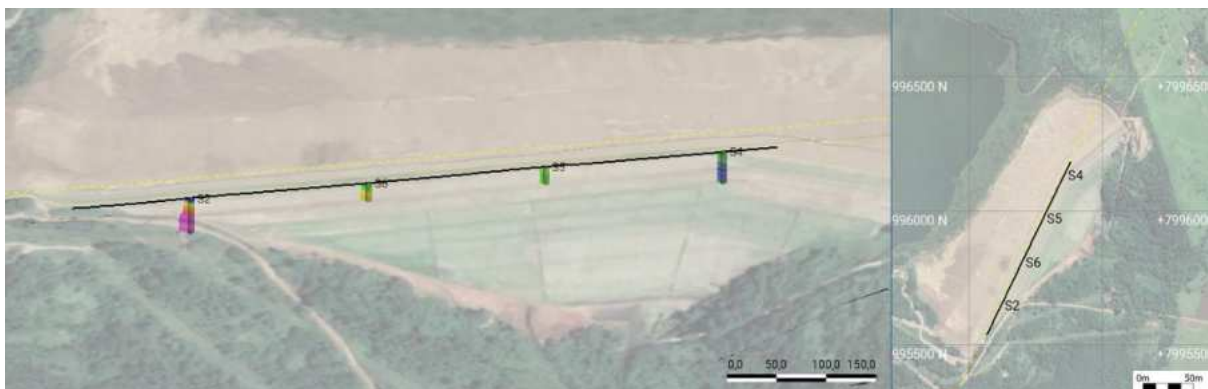


Figura 31: A esquerda os perfis de V_s plotados em profundidade ao Longo da L01 e resultados em m/s referentes a T1. A esquerda, localização dos geofones S2, S6, S5 e S4 vistos em planta.

Abaixo estão representados os perfis com dados pontuais em profundidade da V_s calculada de T0 e a V_s estimada em T1. Nos sensores 2 e 6 não há diferença significativa observada entre os perfis. O sensor 5 destaca-se com o aumento de velocidade de +0.50%. No sensor 4, é possível observar que a queda de 1% na

variação de Vs resulta na intensificação das zonas de baixa velocidade, indicadas em azul e verde, ao longo do perfil, especialmente nas profundidades entre 20 e 35 metros. A velocidade mínima registrada nesse perfil foi de 189 m/s e a considerada como máxima de 216 m/s em respectivas profundidades de aproximadamente 36m e 3m (Figura 32).

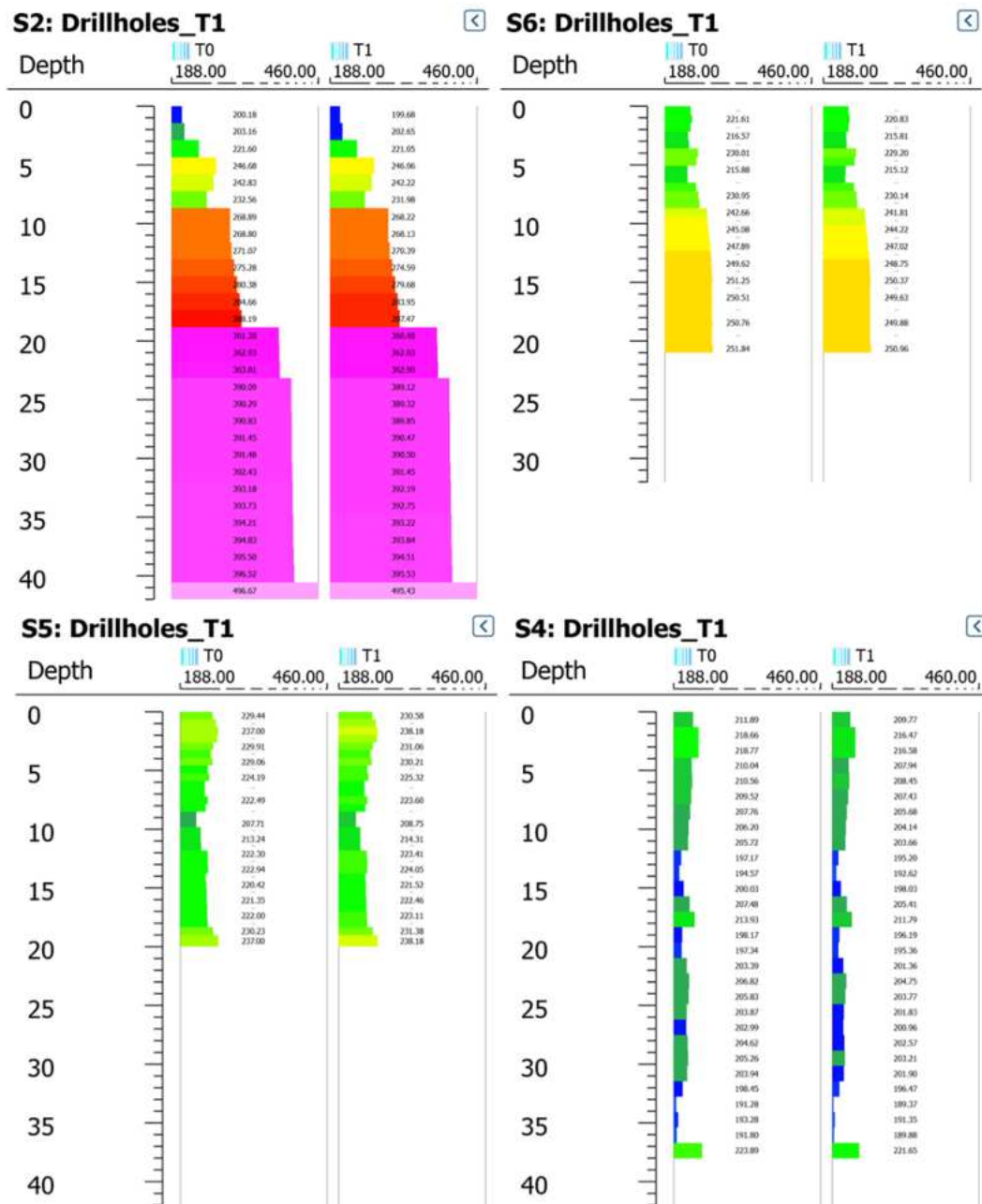


Figura 32: Perfis 1D de Vs em profundidade para os Sensores 2, 6, 5 e 4 respectivamente.

7.5. Modelo 1D em T1 e T0

Foi realizada a comparação entre o perfil em profundidade de Vs para T0 e T1 nos pares de pontos de aquisição do MASW e os respectivos sensores referentes a interferometria sísmica do ruído ambiente S2, S6, S5 e S4. Para fins de comparação, a escala horizontal de cada perfil de T1 foi adaptada de acordo com os perfis em T0. Além disso, a comparação de todos os perfis foi limitada a profundidade de 20m para evitar artefatos causados pela ausência de dados pontuais.

Quando comparamos T0 e T1, os perfis apresentam uma tendência similar na variação de Vs em profundidade. Velocidades menores ocorrem nos primeiros 2,5 m, aproximadamente, e voltando a um comportamento gradual de aumento de velocidade de acordo com a profundidade (Figura 33).

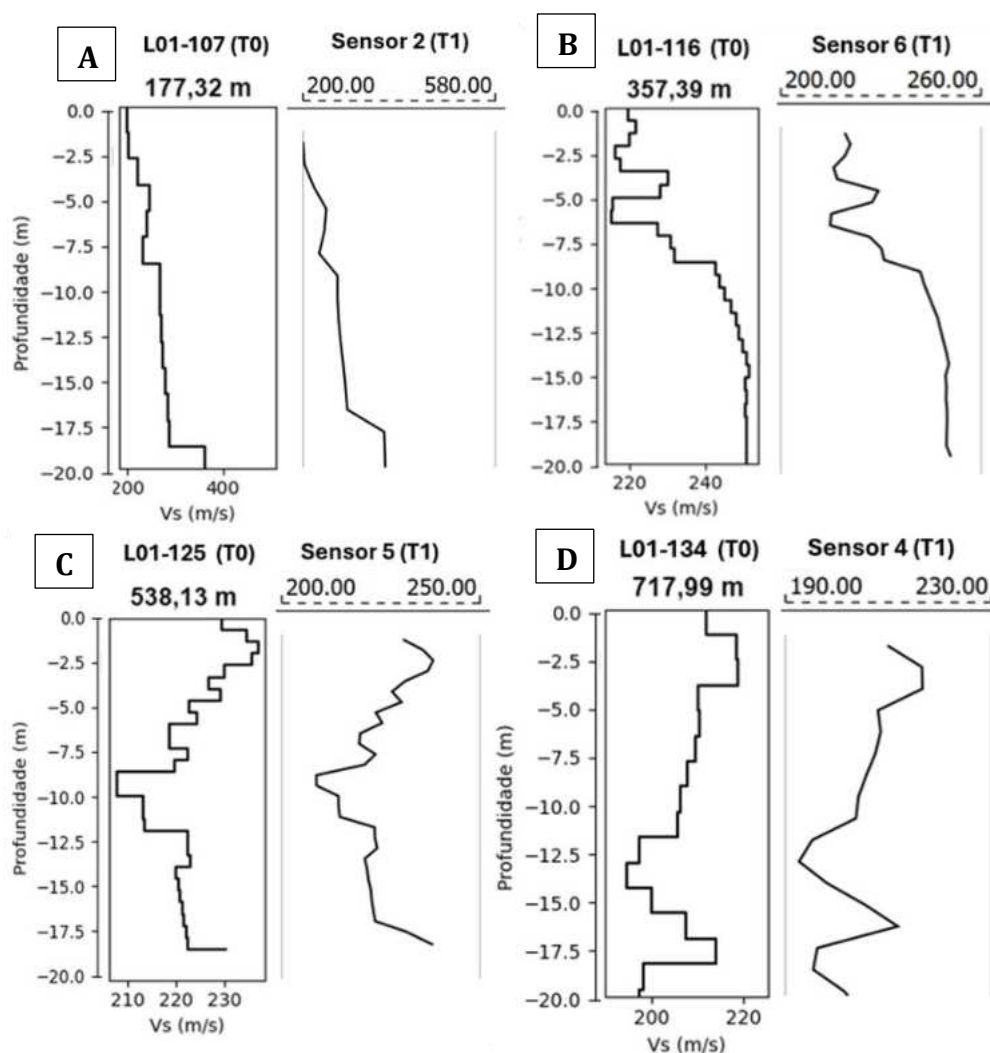


Figura 33: Comparação entre os perfis 1D da variação de Vs em profundidade obtidos em T0 (esquerda) e T1(direita) para o geofone 2 (Imagem A), geofone 6 (imagem B), geofone 5(imagem C) e geofone 4 (imagem D) respectivamente.

7.6. Modelo 2D em T1

Além da análise dos resultados de V_s calculada para T1 e a análises dos perfis 1D em profundidade, nota-se a importância de analisar os dados de forma ampliada lateralmente, com o objetivo de otimizar a interpretação dos modelos 1D. Diante disso, foi desenvolvida uma linha de interpolação detalhada em um modelo bidimensional (2D) nos mesmos limites da L01 do MASW, permitindo a visualização dos dados de forma integrada e com correlação lateral. Dessa forma, será viável não só a investigação de V_s em T1 mas também a comparação com o modelo 2D em T0 a fim de gerar conclusões temporais quanto ao comportamento de V_s e a rigidez da estrutura.

A interpretação visual da interpolação na L01 ocorre através da mesma escala de cores utilizada para T0, as cores frias indicam as maiores velocidades e as cores quentes menores velocidades. Na seção observada na Figura 34, próximo ao sensor 2, a ombreira direita possui uma zona de maior velocidade na cor magenta entre 318 e 493 m/s, em uma cota entre aproximadamente 770m até o final da linha interpolada em aproximadamente 730m. Acima dessa zona de maiores V_s , observa-se uma zona de transição de aproximadamente 8 metros até a superfície da crista com V_s variando entre 318 a 278 m/s entre a cota 770 e 777. No centro do maciço, próximo ao sensor 6, nota-se um gradiente de velocidade que em maiores profundidades chega a 283 m/s e na menor profundidade o mínimo observado é de 218 m/s. Entre o sensor 5 e 4 a maior velocidade observada na seção é de 243 m/s em amarelo a menor velocidade de 223 m/s em verde claro na parte superior da seção. Logo abaixo ao Sensor 4 observa-se apenas zonas de velocidade abaixo de 218 m/s, destacando a ocorrência de uma zona entre 188 a 203 m/s nas cores azul e verde escuro em respectivas profundidades de 10m e 30m a partir da superfície.

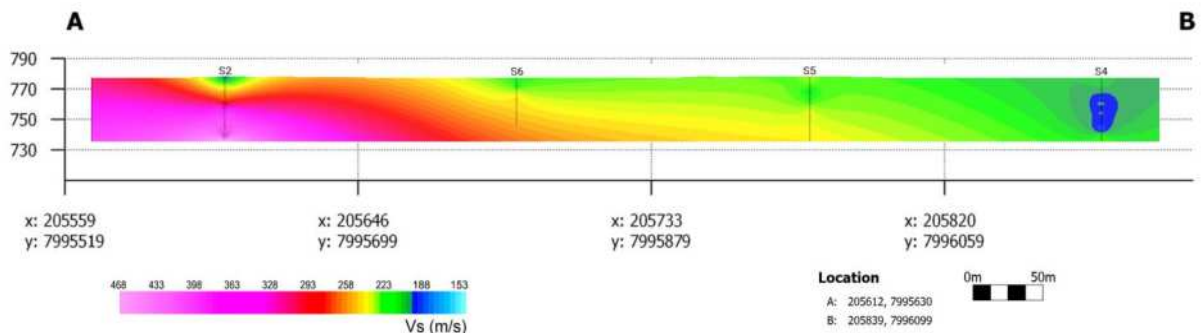


Figura 34: Seção A-B referente a interpolação 2D da L01 de MASW (T0); além do posicionamento dos Sensores 2, 6, 5 e 4 ao longo da linha.

7.7. Seção combinada

O resultado das seções de T0 e T1 são utilizados para mapear as zonas de influência com V_s menor que 229 m/s na crista da estrutura. O resultado da seção combinada corresponde as zonas de maior queda de variação de V_s entre 2021 e 2022.

Próximo ao sensor 2 na superfície da estrutura observamos uma pequena zona de velocidade entre 203 e 228 m/s próximo a superfície na cota aproximadamente 770m. Entre o Sensor 2 e o Sensor 6 foram observadas zonas de velocidade entre 213 e 228 m/s variando em profundidade em cerca de 2 a 14 metros. Entre o S6 e S5 observa-se uma zona de profundidade mínima de 4m e máxima de 25 onde as velocidades variam entre 213 a 228 m/s. Entre S5 e S4 observamos uma zona de velocidade variando entre 218 a 228 m/s. Logo abaixo ao geofone 4 observamos uma zona de baixa velocidade que se destaca nas profundidades de 12, 20 e 35m. Nesse intervalo as velocidades variam entre 193 e 203 m/s (Figura 35).

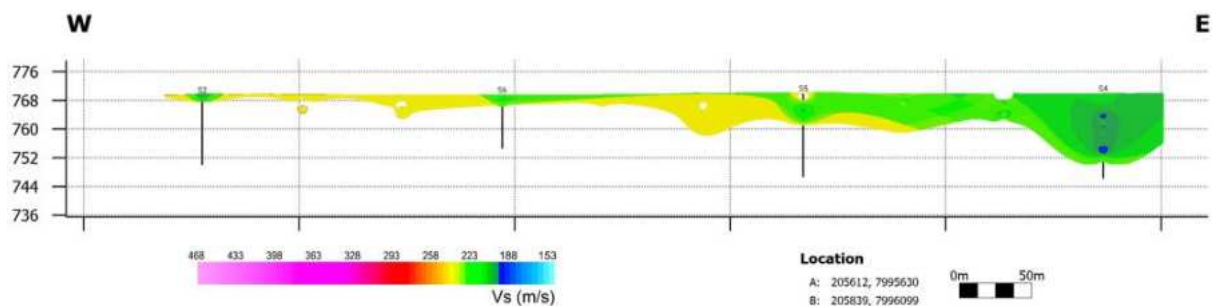


Figura 35: Seção combinada entre T0 e T1 destacando as zonas de baixas velocidades ao longo do período do estudo.

7.8. Modelo de Nível d'água (2021 e 2022)

Em 2021 (Figura 36), o nível da água atingiu aproximadamente 760 metros na crista e ombreiras. No centro do maciço, o nível variou entre 720 e 750 metros, enquanto no pé da barragem o nível ficou em 715 metros. Em 2022 (Figura 37), na crista o nível d'água atingiu a cota de 763 m na crista e ombreiras. No centro do maciço o NA variou entre 715 e 745 metros, enquanto no pé da barragem o nível ficou em 715 metros.

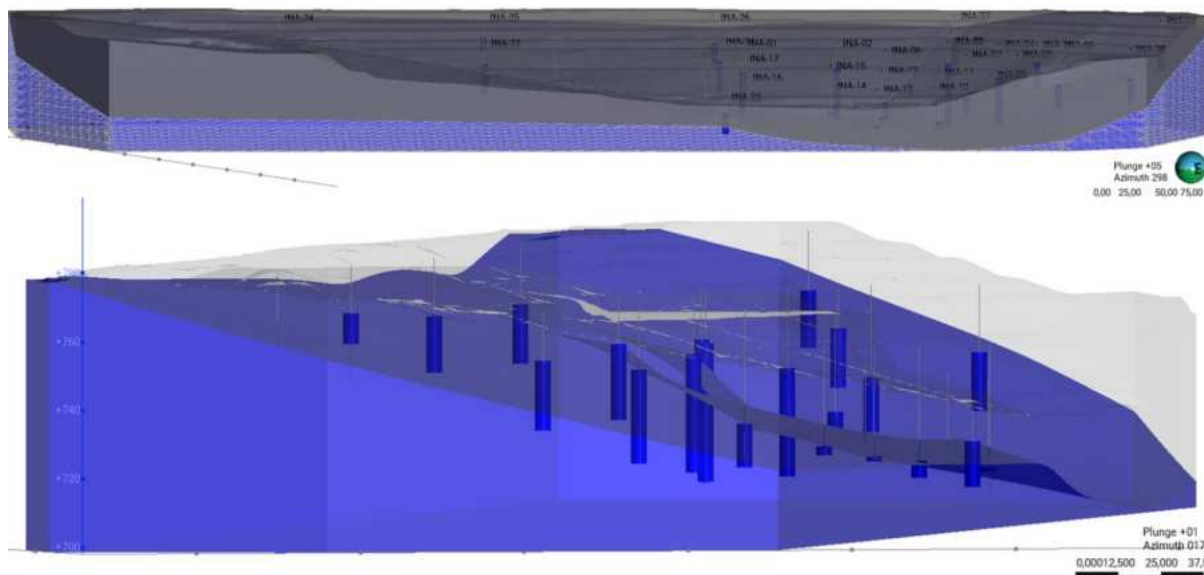


Figura 36: Superfície de nível d'água interpolada a partir dos indicadores de nível d'água em julho de 2021. A superfície azul e triangulada representa o nível d'água e acima dela em cinza com certa transparência é encontrada a superfície topográfica da barragem sem a presença de água. A = Visada da barragem a jusante; B = Visada da barragem a partir da ombreira direita.

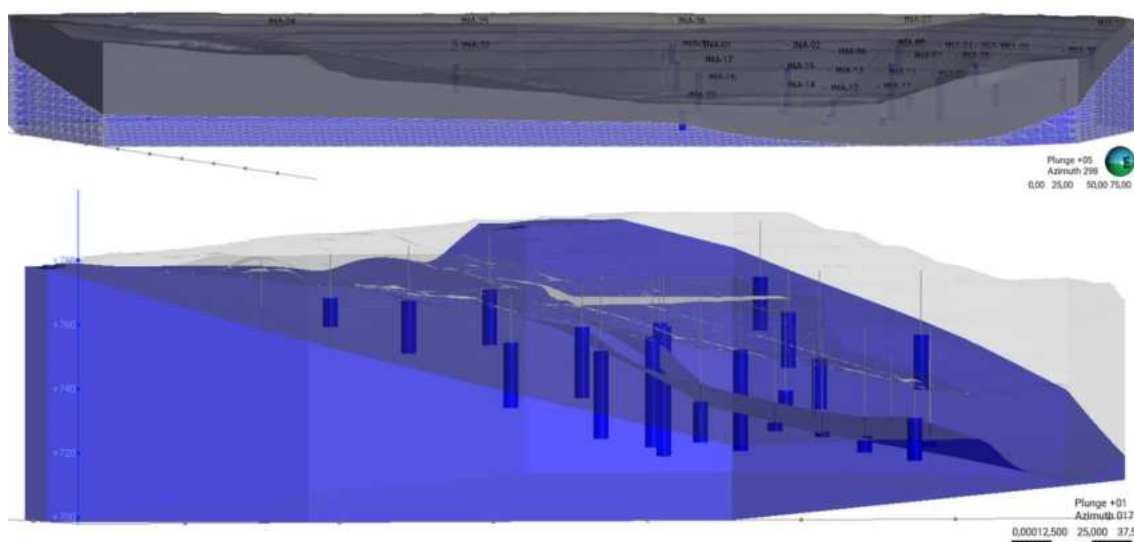


Figura 37: Superfície de nível d'água interpolada a partir dos indicadores de nível d'água em julho de 2022 (imagem B e B.1). A superfície azul e triangulada representa o nível d'água e acima dela em cinza com certa transparência é encontrada a superfície topográfica da barragem sem a presença de água. A = Visada da barragem a jusante; B = Visada da barragem a partir da ombreira direita.

7.9. Ensaio de piezocone (CPTU)

Os ensaios de CPTU evidenciaram a presença de materiais de comportamento dilatante, que condizem com a presença de materiais compactados na porção superior dos instrumentos 02, 05, 07 e 10 e na camada superior dos rejeitos depositados na praia dos CPTUs 01, 04, 08, 11, 12, 14 e 17.

Ao correlacionarmos os resultados dos ensaios de piezocone com o modelo de nível d'água para 2021 observamos que principalmente no CPTU-7, CPTU-10, CPTU-2, CPTU-5 e CPTU-16 a superfície do nível d'água varia ao redor do valor zero medido para a poropressão no ensaio de piezocone, com uma variação de 2 a 4 metros. De forma geral, de 0 a 20m de profundidade esses valores da poropressão variam entre -5 e 30, de 20 a 35m variam de 30 a 150, e a partir de 30m os valores aumentam até em média 300 (Figura 38).

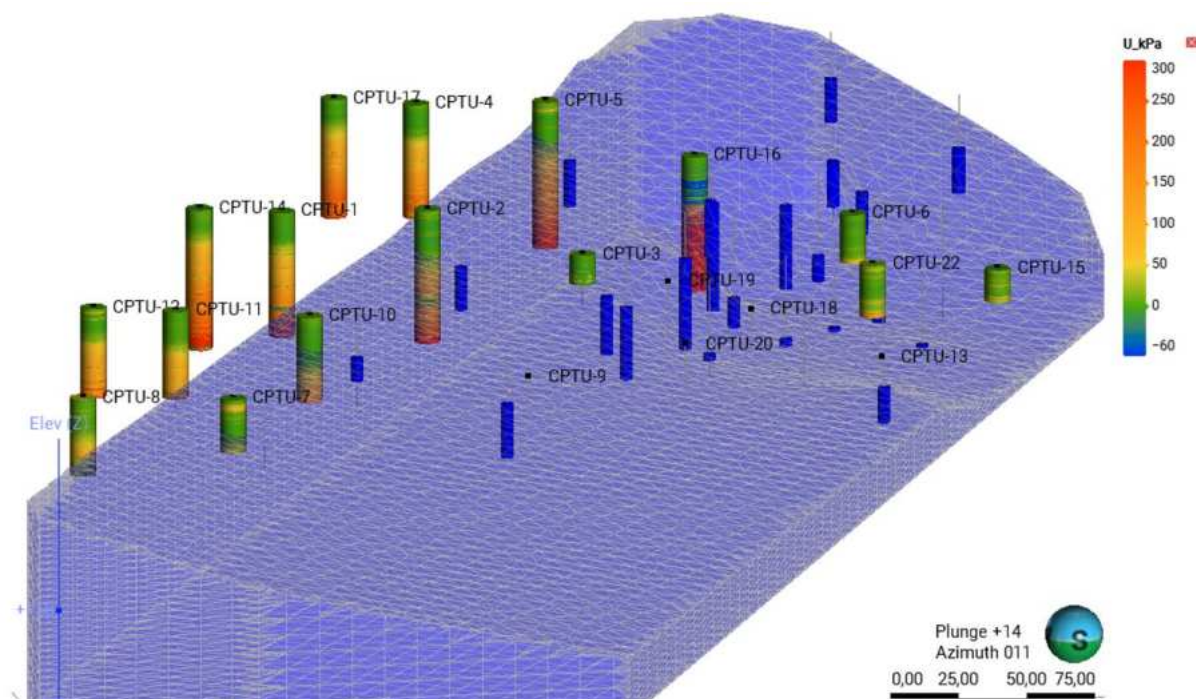


Figura 38: Comparação entre os Indicadores de nível d'água e ensaios de piezocone em 2021.

8. DISCUSSÕES

8.1. Modelo 2D em T0 e T1

As maiores velocidades obtidas em T0 e T1 são predominantemente observadas nas proximidades da ombreira direita, onde a queda de 0,25% de V_s registrada é a menor entre os geofones selecionados no período do estudo. Junto a isso, essas anomalias de baixa velocidade tendem a estar associadas à presença de solo mais compactado. Anomalias locais de baixas velocidades podem ser notadas próximo à região da praia de rejeitos em T0 entre o S2 e S6, configurando possíveis zonas com umidade. Essas anomalias são pouco frequentes em T1 devido ao espaçamento de 180 metros entre os geofones da ANSI não ser suficiente para que a interpolação do modelo 2D crie anomalias desse tipo nessas longas distâncias. Uma camada horizontal e contínua de baixa velocidade, variando entre 198 e 238 m/s é observada entre o S6 e S4. Em T0 essa camada atinge velocidades abaixo de 208 m/s, que são ainda menores em relação a T1, onde essa região ocorre de forma mais discreta gradual na cor verde e atinge V_s mínima de 2013 m/s. Sugere-se um solo menos compactado nessas regiões. Anomalias locais de baixa velocidade também destacam-se logo abaixo do sensor 4, que registrou queda da variação de V_s em 1% e a maior observada no período do estudo. Dessa forma, nota-se a relação entre as

duas zonas de anomalia de baixas velocidades que coincidem ao longo do tempo, onde em T0 a menor Vs registrada foi de 191 e em T1 de 189 m/s. Essas zonas possivelmente configuram uma possível umidade (Figura 39).

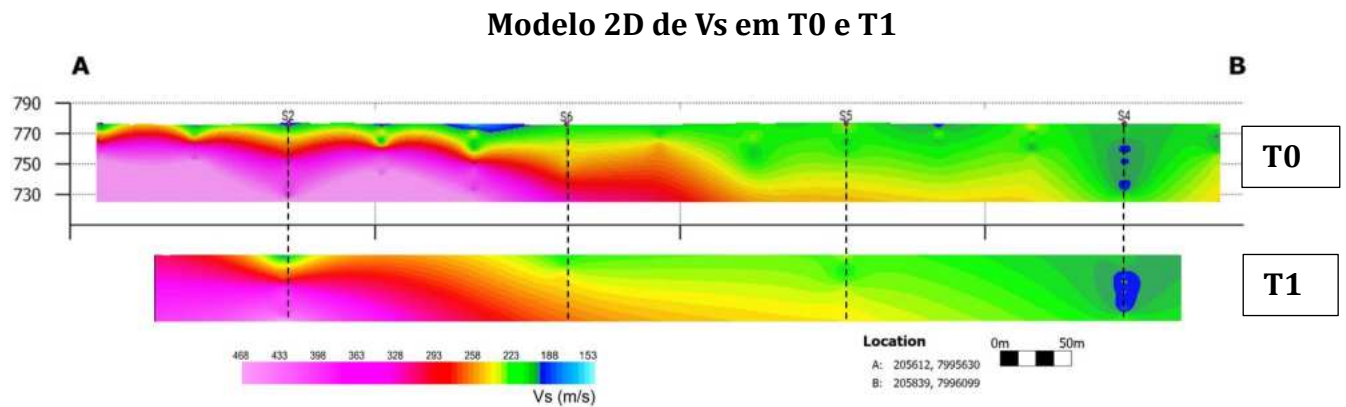


Figura 39: Comparação do modelo 2D entre T0 e T1. Traços pontilhados indicando a localização dos geofones.

A seção combinada resalta que a região da ombreira direita é marcada por uma zona de Vs maior, apresentando velocidades inferiores a 229 m/s apenas próximo a superfície da praia da barragem e sem atingir maiores profundidades. Entre os geofones 6 e 5 as zonas de velocidade entre 240 e 220 m/s são demarcadas. Já na região do geofone 4, é possível observar a região de Vs abaixo de 200 m/s e, em profundidade, mapear o comportamento de Vs tendo em vista que a redução de 1% da variação de Vs na região (Figura 40).

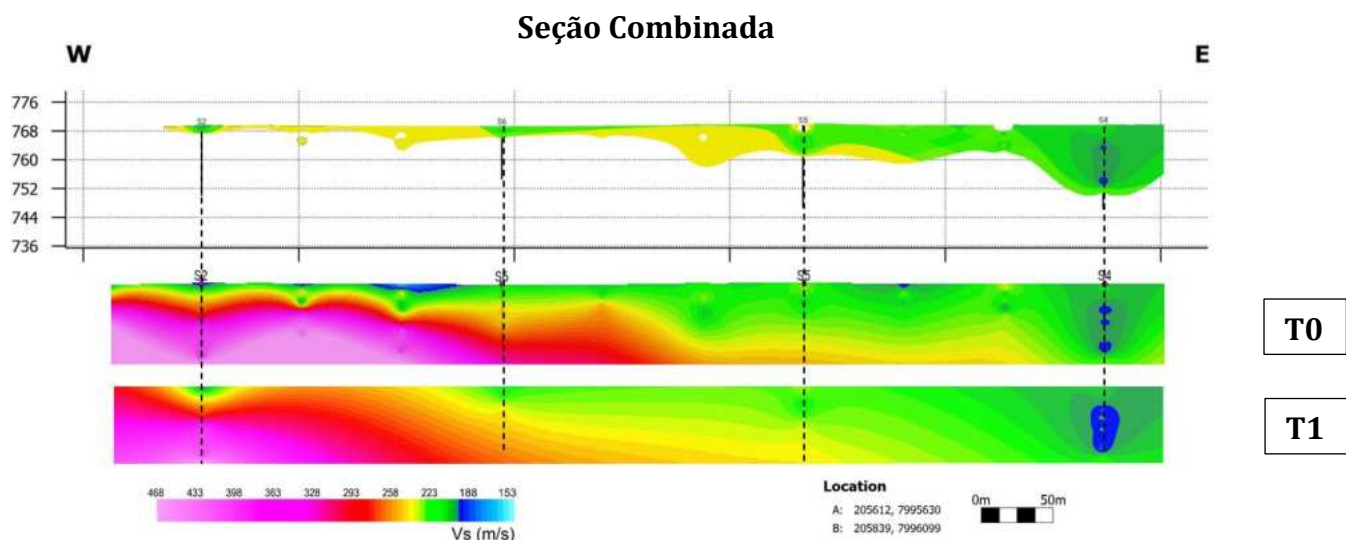


Figura 40: Seção combinada em relação a T0 e T1. Linhas tracejadas indicando a localização do S2, S6, S5 e S4 respectivamente.

8.2. CPTU

Como base nas informações de poropressão (u) obtidas com o ensaio de CPTU é possível identificar as pressões de fluido no solo em profundidade e assim determinar uma linha de poro-pressão hidrostática, indicando um comportamento drenado, o que permite identificar o nível do lençol freático. Nesse sentido, foi possível comparar os modelos de nível d'água elaborados para 2021 e comparar com os dados de CPTU, além de inferir o comportamento prolongado no nível d'água na altura da praia e reservatório, que são regiões com ausência de registro de indicadores de nível d'água (Figura 41).

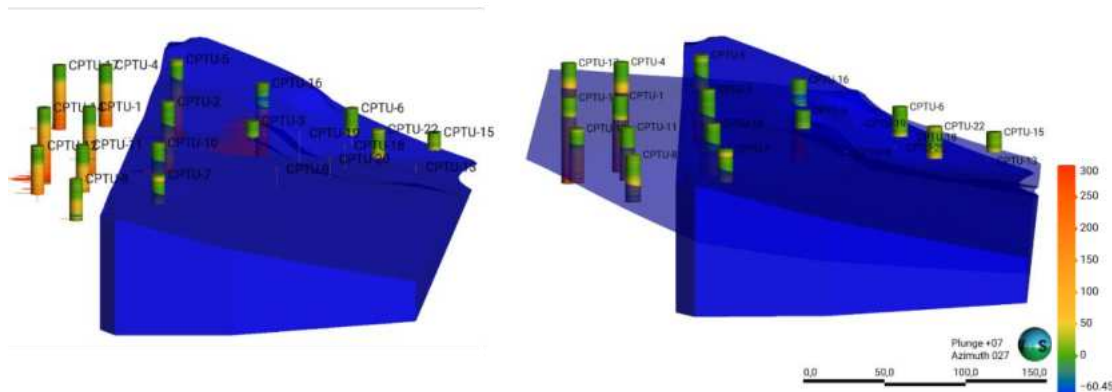


Figura 41: A) Nível d'água interpolado a partir dos INAs. B) Nível d'água inferido a partir dos dados de CPTU, (superfície azulada com transparência). Gráfico de poropressão em vermelho.

9. CONCLUSÃO

Destaca-se a importância de técnicas não invasivas e de monitoramento contínuo de barragens de rejeito. Além disso, a vantagem da combinação das técnicas aplicadas neste trabalho utilizando o MASW para analisar o comportamento do solo, já que o monitoramento através da interferometria resultaria na velocidade estimada das velocidades das ondas S ao longo da estrutura. Este procedimento de análise é fundamental para destacar regiões que sofreram variações substanciais na velocidade das ondas de superfície, indicando potenciais alterações na integridade física da barragem. Além disso, a metodologia aplicada neste trabalho comprova a aplicabilidade da integração de técnicas geofísicas e geotécnicas para o monitoramento de estruturas complexas como barragens de rejeitos.

Durante o período do estudo geofone 4 apresentou a queda de variação máxima de V_s em 1%. Entretanto, o geofone 5 mostra aumento de velocidade de

0,50%, destacando-se como o único entre os 4 sensores utilizados no estudo com aumento de variação de Vs.

O modelo 1D de Vs para T1 mostrou resultados satisfatórios ao compararmos o comportamento de Vs em profundidade em T0 e T1. Os modelos 2D também apresentaram resultados satisfatórios, sendo possível delimitar em detalhe as regiões com base no comportamento de Vs e inclusive compará-los em profundidade e ao longo do tempo.

O geofone 2, 6 e 5 estão distribuídos da ombreira direita em direção ao centro do maciço na crista da barragem. Na linha de MASW essa região se destaca pela presença de uma zona de alta Vs possivelmente devido a influência dos materiais de solo compactado na ombreira. As variações de Vs nesses sensores não teve relevância substancial. Já na região do geofone 4, em profundidade, observamos velocidades abaixo de 200 m/s entre 12 e 15 metros de profundidade. Além disso, a variação de Vs nesse sensor decresceu 1% desde o início do estudo, delimitando uma região de possível presença de umidade na estrutura. Ficou evidente na seção combinada que a região do geofone 4 destaca-se com as menores Vs em profundidade ao longo da L01.

A correlação do modelo de nível d'água de 2021 com os dados de CPTU mostra que a partir dos dados de poropressão é possível inferir o nível freático em regiões onde não há informações dos indicadores de nível d'água.

10. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Roberto et al. Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa: aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo. Anuário do Instituto de Geociências, v. 42, n. 1, p. 567-579, 2019.
- AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. Geotechnical news, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.
- BITTAR, Rafael J.; GOMES, Romero César; BARBOSA, Antônio C. Avaliação da Permeabilidade em Barragens de Rejeitos de Mineração com o emprego do Permeâmetro de Guelph. 2006.
- CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração—uma revisão. Holos, v. 8, p. 77-85, 2016.
- DE CAMARGO BARROS, José Maria; GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil; ROCHA, Ronaldo. A Determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo pelo Método MASW.
- DORNAS, Andréa Leal Loureiro. Análise do comportamento geotécnico da barragem Forquilha III para a geometria atual e para alteamentos futuros pelo método de montante. 2008.
- DUARTE, Anderson Pires. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. 2008.
- EATON, David W. Passive seismic monitoring of induced seismicity: Fundamental principles and application to energy technologies. Cambridge University Press, 2018.
- ESPÓSITO, Terezinha de Jesus; DUARTE, Anderson Pires. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, p. 393-398, 2010.
- HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. Fundamentos de Física. Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 2002
- HAYASHI, Koichi. Development of surface-wave methods and its application to site investigations. 2008.
- HERMIDA, Camila do Carmo. Padrão de especialização comercial e crescimento econômico: uma análise sobre o Brasil no contexto da fragmentação da produção e das cadeias globais de valor. (2016).
- LUNNE, Tom; BERRE, Toraly; STRANDVIK, Stein. Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. In: Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics CAPES-Fundacao Coordenacao do Aperfeicoamento de Pessoal de Nivel Superior; CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; FAPERJ-Fundacao de Ampora a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro; FINEP-Financiadora de Estudos e Projetos. 1997.
- OLIVEIRA, Lorena Andrade. Caracterização de barragens de rejeito através de métodos geofísicos elétricos: estudo de caso na barragem B1 de Cajati, São Paulo. 2018.

OLIVIER, Gerrit et al. Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine. *Geophysics*, v. 80, n. 3, p. KS11-KS25, 2015.

REZENDE, Diego Alves de. Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos. 2013.

RODRIGUES, C. T. et al. Passive seismic interferometry's state-of-the-art—a literature. 2019.

SILVA, Washington Pirete da. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). 2010.

SNIEDER, Roel. The theory of coda wave interferometry. *Pure and Applied geophysics*, v. 163, p. 455-473, 2006.