



Aline Roza de Faria

Monitoramento de Barragens de Rejeito Utilizando os Métodos Geofísicos de Eletrorresistividade e Microsísmica no Estado de Goiás

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos

Coorientador: Marco Antônio da Silva Braga

Rio de Janeiro
Outubro de 2023



Aline Roza de Faria

Monitoramento de Barragens de Rejeito Utilizando os Métodos Geofísicos de Eletrorresistividade e Microssísmica no Estado de Goiás

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovado pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Prof. Marco Antônio da Silva Braga

Coorientador

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Raquel Quadros Veloso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Prof. Alessandro Cirone

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio

Prof. Francisco Dourado da Silva

Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Prof. Alan de Souza Cunha

Metta Innovations

Rio de Janeiro, 3 de outubro de 2023.

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Aline Roza de Faria

Graduou-se em Geologia na UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro) em 2007, tendo exercido a profissão de geóloga entre 2007 até 2020. Ingressou em 2017 no curso de Mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa de Geofísica aplicada à Barragens.

Ficha Catalográfica

Roza, Aline

Monitoramento de barragens de rejeito utilizando os métodos geofísicos de eletrorresistividade e microssísmica no estado de Goiás / Aline Roza ; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos; coorientador: Marco Antônio da Silva Braga. – 2023.

147 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Barragem de rejeito. 3. Eletrorresistividade. 4. Microssísmica. I. Campos, Tácio Mauro Pereira de. II. Braga, Marco Antônio da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD:624

Dedico esta dissertação ao
meu marido Marcio.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Olorum, por ter me mantido persistente nesta empreitada. Não me permitindo desistir, mesmo diante das dificuldades.

A minha família: meus filhos Pedro e Manuela, meu marido Marcio Jorge pela paciência, compreensão e carinho que me dedicaram. Aos meus pais por tudo que investiram em mim, tanto na educação quanto na força que precisei para trilhar esse caminho. Ao meu irmão Gustavo Roza e minha cunhada Rafaela Bueno, por serem incansáveis e por estarem disponíveis sempre que eu precisei de ajuda.

Aos meus amigos e companheiros de estudo Priscilla Mofato, Joanna Maciel, Caio Araújo e Natacha Oliveira que muito contribuíram com o meu aprendizado, que muito me apoiaram. Certamente se não fosse por eles eu não teria conseguido.

Ao meu orientador, Tácio de Campos, pelos conhecimentos passados, pela orientação e apoio durante a pesquisa.

Ao meu coorientador, Marco Antônio Braga, que sempre foi para mim um exemplo a ser seguido, uma inspiração. Onde eu sempre encontrei a ajuda que eu precisava, seja para o desenvolvimento desta pesquisa, quanto nas outras em que tive a oportunidade de trabalhar.

A Filipa Gama por toda ajuda que recebi para o desenvolvimento dessa dissertação, me auxiliando na operação do Geosoft.

A Benthic do Brasil por me permitir desenvolver a dissertação mesmo nos horários de trabalho.

Aos meus irmãos de terreiro que estiveram ao meu lado me apoiando e rezando por mim.

Aos meus amados amigos Dianne Moraes e Rodrigo Pimentel, que nunca se esqueceram de mim e me deram alento para continuar.

Ao professor Anjinho, que se colocou à disposição para me ajudar nos estudos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio, em especial à Luana, secretária de pós-graduação do Departamento.

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

A todos os professores do curso de mestrado pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

Resumo

Roza, Aline. **Monitoramento de Barragens de Rejeito Utilizando os Métodos Geofísicos de Eletrorresistividade e Microssísmica no Estado de Goiás**. Rio de Janeiro, 2023. 147p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O monitoramento de barragens de rejeito, essencial para prevenir acidentes, se baseia em inspeções visuais e instrumentação geotécnica. Devido a recentes incidentes, o aprimoramento tornou-se crucial, levando à incorporação da geofísica neste estudo. Assim, com o objetivo de aprimorar o monitoramento convencional durante e após a descaracterização de duas barragens localizadas em Catalão – Goiás, foi executada uma campanha para aquisição de seis perfis de eletrorresistividade com a finalidade de verificar as condições de saturação em subsuperfície. Além disso foi implantado um sistema de monitoramento microssísmico contando com quinze estações sismográficas. A partir das anomalias identificadas pela campanha realizada em maio de 2022 e das seções geológicas, foi possível estabelecer pontos de atenção que indicam materiais com umidade elevada em locais onde tal ocorrência não era de se esperar. O monitoramento a partir da microssísmica convencional permitiu identificar que as detonações realizadas, em sua maioria não fizeram o maciço vibrar de forma preocupante e o responsável pelo disparo dos alertas gerados foi a atividade humana e movimentação de maquinário. Já no caso da microssísmica passiva, devido ao pouco tempo de monitoramento, não foram registradas variações significativas no percentual de velocidade que possibilite uma análise assertiva do comportamento do maciço.

Palavras-chave

Barragens de rejeito, geofísica, eletrorresistividade, microssísmica

Abstract

Roza, Aline. **Monitoring Tailings Dams Using Geophysical Methods of Electrical Resistivity and Microseismic in the State of Goiás**. Rio de Janeiro, 2023. 147p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The monitoring of tailings dams, crucial to prevent accidents, is based on visual inspections and geotechnical instrumentation. Due to recent incidents, enhancement has become crucial, leading to the inclusion of geophysics in this study. Therefore, aiming to improve conventional monitoring during and after the alteration of two dams located in Catalão, Goiás, a campaign was conducted to obtain six electrical resistivity profiles to assess subsurface saturation conditions. Additionally, a microseismic monitoring system was implemented, involving fifteen seismic stations. By analyzing anomalies identified during the campaign in May 2022 and geological sections, it was possible to identify areas with unexpectedly high moisture content in places where such occurrences were not expected. Conventional microseismic monitoring revealed that most detonations did not significantly cause the mass to vibrate worryingly, with alerts primarily triggered by human activity and machinery movement. However, in the case of passive microseismic monitoring, due to the short monitoring period, no significant variations in the velocity percentage were recorded to enable a conclusive analysis of the mass's behavior.

Keywords

Tailing dams, geophysics, electroresistivity, microseismic.

Sumário

1	Introdução.....	23
1.1	Aplicação de Geofísica em Barragem de Rejeito.....	25
1.2	Objetivos.....	32
1.3	Estrutura e Organização da Dissertação.....	32
2	Barragem de Contenção de Rejeito.....	34
2.1	Métodos Construtivos.....	35
2.1.1	Método a Jusante.....	36
2.1.2	Método a Montante.....	37
2.1.3	Método Linha de Centro.....	38
2.2	Instrumentação.....	39
2.3	Investigações de Campo.....	41
3	Área de Estudo.....	43
3.1	Aspectos Geológicos.....	46
3.1.1	Geologia Regional.....	46
3.1.2	Geologia Local.....	47
3.2	Descrição das Barragens.....	48
3.2.1	Monitoramento Geotécnico.....	49
3.2.2	Investigações de Campo.....	53
4	Metodologia.....	57
4.1	Eletrorresistividade.....	57
4.1.1	Técnicas de Campo.....	61
4.2	Microssísmica.....	70
4.2.1	Sismologia e Sismicidade.....	70
4.2.2	Ondas Sísmicas.....	71
4.2.3	Localizando Terremotos.....	74
4.2.4	Medindo Terremotos.....	76
4.2.5	Propriedades de um Sismograma.....	78
4.2.6	Monitoramento Microssísmico.....	80

5	Resultados e Discussões.....	93
5.1	Eletrorresividade	93
5.1.1	Seções de Eletrorresistividade	96
5.1.2	Discussão.....	107
5.2	Microsísmica	110
5.2.1	Convencional.....	111
5.2.2	Interferometria Sísmica.....	128
5.2.3	Discussão.....	132
6	Conclusões	135
6.1	Sugestões para Estudos Complementares	136
	Referência	138

Lista de Figuras

Figura 1: Variações de velocidade sísmica para um sensor. Como pode ser observado, após a explosão há uma nova linha de base da velocidade sísmica. Modificado de Olivier et al. 2015.	30
Figura 2: a) Vista frontal esquemática e (b) Vista em corte transversal do aterro do canal. Uma haste de metal de 1,3 cm de diâmetro foi embutida no meio da estrutura durante a construção, 25 cm abaixo da crista. Dez geofones de componentes verticais foram implantados na crista, com espaçamento de 61 cm. (c) Fotografia do aterro e quebra de fluxo, 5 h após o início do piping. Retirado de Planès et al, 2016.	30
Figura 3: Mudanças de velocidade relativa para os pares de sensores de deslocamento de 1-2 m, ao longo das primeiras 4 h do experimento. A maior queda de velocidade (20%) é observada no centro da estrutura, onde se espera que o processo de piping influencie na variação da velocidade de onda. Retirado de Planès et al, 2015	31
Figura 4: Método construtivo a jusante. Retirado de Albuquerque (2004).	36
Figura 5: Método construtivo a montante. Retirado de Albuquerque (2004).	37
Figura 6: Método construtivo linha de centro. Retirado de Albuquerque (2004).	39
Figura 7: Localização da área de estudo. Fonte: Google Earth.	43
Figura 8: Mancha de inundação para o caso do rompimento das barragens 1A e 1B. Retirado do SIGBM (Sistema de Gestão de Barragem de Mineração, Cadastro Nacional, site ANM).	44
Figura 9: Visão geral das barragens 1A e 1B em processo de descaracterização. Retirado de Google Earth.	45
Figura 10: Mapa geológico da Provincia Ígnea do Alto Parnaíba. Retirado de Silva, 2019.	46
Figura 11: Esquema geológico do complexo carbonatítico de Catalão I, retirado de Silva, 2019.	48
Figura 12: Descrição da barragem 1A.	49
Figura 13: Descrição da Barragem 1B.	49

Figura 14: Distribuição dos instrumentos de monitoramento das barragens 1A e 1B. Os indicadores de nível de água (INA) estão representados em azul claro, os piezômetros (PZ) em azul, e os poços de monitoramento e furo de sondagem (PM e DH) em lilás. Fonte da imagem: Google Earth, coordenadas UTM, WGS 84. _____	50
Figura 15: Superfície do lençol freático criada a partir dos instrumentos que medem o nível d'água (INA's, PM's e DH). _____	51
Figura 16: Superfície criada a partir das leituras obtidas pelos piezômetros. _____	51
Figura 17: Instrumentação existente e proposta da barragem 1B. _____	52
Figura 18: Distribuição dos CPTU's executados. Fonte: Google Earth. _____	53
Figura 19: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-002. _____	54
Figura 20: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-003A. _____	55
Figura 21: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-015. _____	55
Figura 22: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-017. _____	56
Figura 23: Arranjo de eletrodos: A e B induzem a corrente elétrica; M e N medem a diferença de potencial. Retirado de Braga, 2016. _____	58
Figura 24: Fluxo de corrente elétrica em um meio homogêneo (Dentith e Mudge, 2014) _____	58
Figura 25: Faixa de variação nos valores de resistividade, retirado de Braga, 2006. _____	61
Figura 26: Perfilagem elétrica efetuada no interior de furos de sondagem (retirado de Braga, 2006). _____	62
Figura 27: Investigação das variações de parâmetros geoeletricos, com a profundidade a partir de um ponto fixo do terreno (retirado de Braga, 2006). _____	62
Figura 28: Investigação laterais das variações de parâmetros geoeletricos, com a profundidade (retirado de Braga, 2006). _____	63
Figura 29: Arranjos Wenner alfa, beta e gama. Retirado de Gandolfo (2007). _____	64
Figura 30: Arranjos polo-dipolo. Retirado de Gandolfo, 2007. _____	65
Figura 31: Arranjos Schlumberger. Retirado de Gandolfo, 2007. _____	65
Figura 32: Arranjo dipolo-dipolo, retirado de Braga (2006). _____	66

- Figura 33: Criação de uma pseudo-seção a partir do arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de Dentith & Mudge, 2014. _____ 67
- Figura 34: Sistema de plotagem pela média do triângulo, retirado de Braga, 2006. _____ 69
- Figura 35: Exemplo de arranjo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo dipolo-dipolo. Retirado de Gandolfo, 2007. _____ 69
- Figura 36: Seção vertical, perpendicular ao plano de falha, definindo epicentro, foco e distância focal de um terremoto. _____ 71
- Figura 37: Chegada das ondas sísmicas em um sismograma. Modificado de Kusky (2008). _____ 72
- Figura 38: Principais modos de propagação sísmica, sendo (a) ondas P, longitudinal; (b) ondas S, transversal; (c) ondas Rayleigh, combinação das ondas P e S, a partícula assume um movimento elíptico; e (d) ondas Love, oscilação horizontal transversal. Retirado de (Assumpção & Neto, 2000). _____ 74
- Figura 39: A ilustração apresenta o processo de localização de um evento sísmico pelo método do círculo. As estações correspondem a S1, S2 e S3 e seus respectivos raios, d_1 , d_2 e d_3 . A área hachurada representa o epicentro, onde os círculos se interceptam. Retirado de Havskov, 2012. _____ 75
- Figura 40: Padrão de radiação de uma explosão e de um evento natural. Adaptado de Malovichko (2012). _____ 82
- Figura 41: Exemplos de amplitudes de assinaturas sísmicas geradas por um evento microssísmico ($M_w < 0$), em azul, e por um terremoto natural ($M_w > 5$), em vermelho. Fonte: Adaptado de Kamei et al. (2015). _____ 83
- Figura 42: Princípio de funcionamento de um geofones, sendo V_0 a voltagem; R a resistência; L a indutância; m a massa suspensa; k a mola; c o dispositivo mecânico (amortecedor); w e x variáveis que indicam a movimentação da base do sensor em relação a massa suspensa. Retirado de Collette et al., 2011. _____ 85
- Figura 43: Princípio de funcionamento de um acelerômetro, sendo V_0 a voltagem; R a resistência; L a indutância; m a massa suspensa; k a mola; c o dispositivo mecânico (amortecedor); w e x variáveis que indicam a

- movimentação da base do sensor em relação a massa suspensa. A força f é proporcional a voltagem (V_0) sobre a resistência (R). Retirado de Collette et al. (2011). _____ 86
- Figura 44: Exemplo de atenuação para eventos de desmonte. Adaptado de Silva-Castro, 2012. _____ 87
- Figura 45: Sismogramas típicos de desmonte. Adaptado de Malovichko, 2012. _____ 87
- Figura 46: Exemplo de formas de ondas para diferentes fontes: (a) a (c) fraturamento de rocha; (d) ruído elétrico; (e) sondagem; (f) detonação; (g) vibração por desenvolvimento de túneis por TBM (Tunnel Boring Machine); e (h) passagem de equipamento pesado em um túnel. Retirado de Xiao et al. (2016). _____ 88
- Figura 47:(A) A velocidade sísmica retoma seu estado de normalidade, configurando cicatrização completa; (B) A velocidade sísmica é alterada de forma permanente, configurando cicatrização parcial. _____ 89
- Figura 48: A figura ilustra a dependência da velocidade sísmica em materiais fraturados. (modificado de Dias et al, 2016). _____ 89
- Figura 49: Representação da propagação de onda em um sistema microsísmico pela abordagem passiva. (a) Fonte impulsiva em $x = X_0$ e $t = t_0$. (b) A resposta no geofone 1, em $t = t_1$ (c) A resposta no geofone 2, em $t = t_2$. (d) Correlação cruzada. Retirado de Rodrigues et al (2020). _____ 90
- Figura 50: Distribuição das seções. Fonte: Google Earth. _____ 94
- Figura 51: Condições do local onde foi executado o levantamento: (a) Linha T10, (b) linhas L6, (c) Linha L9. _____ 95
- Figura 52: Localização das seções de eletrorresistividade na barragem 1B: seções - ver escala de cores; lençol freático em azul claro e curvas de nível em cinza. _____ 96
- Figura 53: Seção T9, região com alta resistividade à direita e anomalia condutiva a esquerda. _____ 98
- Figura 54: Seção típica da Barragem 1B, correlacionada a seção T9. _ 99
- Figura 55: Seção T10A, perpendicular a crista apresentando anomalia condutiva abaixo de material resistivo. _____ 101

Figura 56: Seção T10 com anomalia condutiva a direita. _____	102
Figura 57: Seção típica correlacionada à seção T10. _____	103
Figura 58: Seção L9, camada superficial resistiva e contínua até mudança abrupta para material condutivo (a direita). Erro! Indicador não definido.	
Figura 59: Seção L6, longitudinal com material resistivo contínuo e aflorante. _____	105
Figura 60: Seção L9, camada superficial resistiva e contínua até mudança abrupta para material condutivo (a direita). _____	105
Figura 61 _____	106
Figura 62: Seções de eletrorresistividade com a superfície que contém os valores abaixo de 50 Ohm·m e as zonas de atenção descritas no texto: (1) seção T9, (2) seção T10A, (3) seção T10 e (4) seção L6. ___	107
Figura 63: Seção T9 (SE-NW), superposta à seção geológica 15-15'. _____	108
Figura 64: Seção T10A (SE-NW) superposta à projeção da seção geológica 16-16'. _____	108
Figura 65: Seção T10 (SW-NE) superposta à projeção da seção geológica 16-16'. _____	109
Figura 66: Imagem em 3D das seções eletrorresistivas com a superfície modelada a partir das leituras dos piezômetros. _____	110
Figura 67: Resumo do serviço de monitoramento microsísmico. _____	111
Figura 68: Localização das 4 estações emergenciais. _____	112
Figura 69: Localização das estações sismográficas. _____	113
Figura 70: Gráfico do pico de aceleração máxima do solo (PGA) para o teste de martelo do dia 01/11/2021. Fica registrada a atividade entre às 12:00-12:30 (hora local). O teste excedeu os limites de PGA estabelecidos. _____	114
Figura 71: Gráfico da PGV (m/s) do evento de detonação do dia 25/11/2022 no período de 12:00 a 13:00. As estações CCS10, CCS11, CCS12, CCS13, CCS14 e CCS15 marcam bem o evento que ocorreu às 12:41, como demonstrado no gráfico. _____	115

Figura 72: Gráficos PGA em fração de g para os domingos compreendidos entre 21/01/2023 à 28/02/2023. A) Componentes horizontais das estações e b) componente vertical.	116
Figura 73: Realocação das estações CCS08, CCS09 e CCS10.	117
Figura 74: Alertas de gatilho entre os dias 31/10/2022 e 07/11/2022.	119
Figura 75: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 3 de novembro.	119
Figura 76: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 5 de novembro.	120
Figura 77: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 12 de novembro.	120
Figura 78: Localização da estação CCS08 indicando a direção da vibração do evento registrado no dia 12 de novembro.	121
Figura 79: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 16 de novembro.	121
Figura 80: Registro em câmara do momento da passagem do trator.	122
Figura 810: Sismogramas registrados nas estações das barragens 1A/2A, no momento do alerta emitido no dia 27/12.	122
Figura 82:Alerta do 04/01/2023 às 08:14:06 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma.	123
Figura 83: Alerta do 05/01/2023 às 15:57:26 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma.	124
Figura 84: Alerta de 13/01/2023 às 08:14:57 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma.	125
Figura 85: Alerta de 13/01/2023 às 11:10:42 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrados no momento do alerta. B)	

- espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma. _____ 125
- Figura 86: Alerta de 16/01/2023 às 08:41:00 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma. _____ 126
- Figura 87: Alerta de 17/01/2023 às 07:46:15 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma. _____ 126
- Figura 88: Alerta de 17/01/2023 às 10:15:34 (hora local), estação CCS04_HHZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para Fast Fourier Transform (FFT). C) Espectro médio do sismograma. D) Ampliação do pico destacado em a). _____ 127
- Figura 89: Gráficos mostrando a variação percentual de velocidades em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. b) para barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica. _ 129
- Figura 90. Ampliação dos gráficos mostrando a variação percentual de velocidades em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. b) para barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica. _____ 130
- Figura 91: Gráficos mostrando a variação percentual de velocidade em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. (b) e barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica. _ 131
- Figura 92: Os círculos vazios se referem aos dados obtidos com a rede de estações anterior e os preenchidos se referem a rede sismográfica atual. a) Gráficos de PGV e b) PGA. Ambos em função da distância das detonações. _____ 132
- Figura 93: Imagem de satélite com a posição das detonações realizadas e das estações sismográficas. _____ 133

Lista de Tabelas

Tabela 1: Profundidades executadas dos ensaios de CPTu _____	54
Tabela 2: Comparação entre as escalas Richter e Mercalli Modificada, retirada de Kusky (2008). _____	77
Tabela 3: Orientação e comprimento das seções de ERT. _____	94
Tabela 4: Limiares em fração de g para emissão de alerta de evento sísmico. Vermelho: emergência. Amarelo: aviso. _____	113
Tabela 5: Relação dos eventos por relatório semanal. _____	118

Lista de Símbolos

VP	Velocidade da onda P
γ	Módulo de Young
ρ	Densidade
ν	coeficiente de Poisson
μ	módulo rigidez ou módulo de cisalhamento
VS	Velocidade da onda S
Hz	Hertz
PDG	Peak ground displacement
PGV	Peak ground velocity
PGA	Peak ground acceleration
Fmax	Força máxima
m	Massa
Vo	Voltagem
R	Ressitência
L	Indutância
k	Mola
c	Dispositivo mecânico
J	Densidade da corrente elétrica
I	Intensidade da corrente elétrica aplicada
$2\pi r^2$	Área da semiesfera de raio r

ΔV	Diferença de potencial
V_m	Potencial resultante do eletrodo M
V_n	Potencial resultante do eletrodo N
ρ	Resistividade que o meio oferece a propagação da corrente
ρ_a	Resistividade aparente
K	Arranjo dos eletrodos
SEV	Sondagem elétrica vertical
SED	Sondagem elétrica dipolares
Z	Profundidade teórica atingida em cada nível
R	Distância entre os centros dos dipolos considerados
N	Níveis teóricos de investigação
INA	Medidores de nível d'água
PZE	Piezômetros
CPTU	Piezocone Penetration Test
qc	Resistência a penetração
fs	Atrito lateral
u	Poropressão
qt	Resistência Real Mobilizada
u0	Poropressão de equilíbrio estático
Su	Resistência ao cisalhamento não drenada
PM	Poços de Monitoramento

DH Furo de sondagem

kPa Quilo Pascal

mPa Mega Pascal

1 Introdução

A mineração tem como fator crítico a geração de resíduos e sua respectiva disposição, o que leva a implicações ambientais, sociais e econômicas. Esses resíduos correspondem principalmente ao estéril, material descartado diretamente da lavra (sem processamento na usina de beneficiamento) e rejeito, material descartado durante e/ou após o beneficiamento (lavagem, peneiramento, deslamagem, concentração gravimétrica e magnética, flotação, lixiviação, dentre outras). Ambos, resíduos e rejeitos, podem ser dispostos em pilhas e barragens, sendo indispensável um manejo adequado, bem como um devido monitoramento.

Uma maior atenção foi dada à contenção desses resíduos, principalmente o rejeito objeto de estudo deste presente trabalho, devido aos recentes acidentes ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Tais tragédias ocasionadas pela ruptura de barragens de rejeito, evidenciaram a necessidade de uma reformulação nos modelos de gestão de segurança de barragens. Essas estruturas representam grande desafio à engenharia geotécnica, já que cada barragem é uma obra peculiar e para manter sua segurança são indispensáveis práticas adequadas de caracterização e monitoramento.

De acordo com Azam e Li (2010), barragens de rejeito são estruturas vulneráveis e susceptíveis a falhas. Tal fato se dá pelas seguintes razões: construção de diques com materiais residuais de mineração; alteamento da barragem ao mesmo tempo que o aumento de efluentes; não regulamentação de critérios de projeto, principalmente em países subdesenvolvidos; alto custo de manutenção após o encerramento da mina.

Diferente de uma barragem de terra convencional, onde os materiais são melhor caracterizados e passam por um controle de compactação, os utilizados nos alteamentos em uma barragem de rejeito contêm uma porcentagem mais elevada de água e os processos de liquefação ocorrem, quase sempre em proporções mais graves (CETEM, 2010).

O monitoramento das barragens de rejeito é de responsabilidade do empreendedor e deve ser realizado de forma contínua. Como estas representam

situações únicas, requerem soluções individuais para as suas necessidades quanto à instrumentação. Inspeções visuais desempenham importante papel no controle da situação, visam examinar eventual existência de fissuração, percolação de água pelo maciço, erosão, verificação de operação dos instrumentos dentre outros (Machado, 2007).

Mesmo que o monitoramento de uma barragem de rejeito a partir de instrumentação e inspeções visuais seja indispensável, limitá-lo a essas metodologias leva a um deficiente controle de processos de desestabilização (como percolação de água no talude, por exemplo). Para que estes sejam detectáveis por tais equipamentos é necessário que ocorram de forma mais expressiva, já que pequenas alterações passariam despercebidas. Desta forma, a utilização de novas ferramentas extremamente sensíveis a quaisquer eventos, somariam significativamente no monitoramento de tais estruturas.

Dentro deste cenário, a geofísica tem muito a contribuir, já que permite avaliar as condições geológicas locais através de contrastes das propriedades físicas dos materiais, de forma não invasiva (CETESB, 1999). Os métodos que mais se destacam para desempenhar esse papel são os métodos geoeletricos, como a Eletrorresistividade, pela técnica de caminhamento elétrico (CE). Como vantagem, a eletrorresistividade possibilita a agilidade no levantamento de grandes áreas com menor custo e a identificação mais precisa de variações laterais a partir de perfis contínuos (CETESB, 1999). Ainda que já existam equipamentos de imageamento elétrico que permitam o monitoramento contínuo, a técnica mais utilizada apresenta a real condição dos materiais apenas no momento da aquisição dos dados.

Considerando que a combinação de métodos geofísicos repercute em uma maior precisão das interpretações (CETESB, 1999), em conjunto com a eletrorresistividade, é possível a utilização do monitoramento microsísmico. Este último permite o monitoramento ininterrupto e ainda que não seja capaz de imagear o maciço, possibilita a análise das vibrações que atuam na barragem, induzidas tanto por processos naturais quanto antrópicos (Oliveira, 2021).

Os últimos acidentes de envolvendo o rompimento de barragens alteadas a montante levou a proibição desse método construtivo por meio da Resolução ANM

nº 4/2019, substituída pela Resolução ANM nº 13/2019. Este normativo, o Art. 8º, exige o descomissionamento e a descaracterização das estruturas existentes construídas a montante, além de estabelecer prazos para a elaboração e conclusão dos projetos de descaracterização (Agência Nacional de Mineração, Report Trimestral Descaracterização de Barragens a Montante, setembro de 2023).

1.1 Aplicação de Geofísica em Barragem de Rejeito

Segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) é de responsabilidade do empreendedor (pessoa física ou jurídica que detenha o direito de operação da barragem) a segurança da barragem, o que envolve manter a integridade estrutural e operacional, preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. Assim sendo, cabe ao empreendedor o desenvolvimento de ações para garantir a segurança, de forma a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências.

Quando se trata da saúde de uma barragem de rejeito, métodos mais abrangentes que corroborem com os tradicionais proporcionam maiores condições de controle da estrutura o que mune os empreendedores de informações pertinentes, minimizando os riscos e tornando mais segura a operação da barragem, tal como apontado no PNSB.

Neste contexto, a Agência Nacional de Mineração (ANM) emitiu um comunicado em 11 de fevereiro de 2019 o qual aponta a necessidade, para barragens alteadas a montante, de *“executar investigação na barragem, reservatório e área de influência da estrutura, com métodos indiretos, tais como: como geofísica, microsísmica ou outros métodos que possam apoiar as análises do comportamento no interior da barragem, de modo a complementar as informações advindas de métodos diretos já implementados na barragem, desde que não interfira na condição de estabilidade da estrutura.*

A geofísica é uma ciência que se utiliza de métodos indiretos, não invasivos, para a identificação de diversos parâmetros, a partir de diferentes propriedades físicas (resistividade, condutividade elétrica, susceptibilidade magnética etc.), com baixo custo. Diferentes métodos aplicados ao monitoramento

de estruturas têm sido utilizados, sejam eles de natureza contínua no espaço, mas pontuais no tempo (métodos elétricos), ou contínuos no tempo, mas sem fornecer o imageamento do meio.

Boadu & Owusu-Nimo (2010) realizaram um experimento em laboratório para investigar como as propriedades petrofísicas influenciam as propriedades elétricas de um solo. Os autores verificaram que os valores de resistividade aumentam linearmente conforme o tamanho dos poros aumenta, e diminuem acentuadamente com o aumento dos finos e com o aumento da área superficial.

Boadu & Seabrook (2006) analisaram os efeitos do teor de argila associados a diferentes concentrações de eletrólito na resposta elétrica espectral (*spectral electrical response*, SER) sob tensão efetiva de 20 MPa em 3 misturas de solo controlado em 3 níveis de concentração de NaCl. O estudo revelou que em geral, a resistividade é sensível ao teor de argila e à concentração do fluido nos poros, diminuindo em ambas as condições.

Albuquerque *et al* (2019) e Oliveira *et al* (2023) utilizaram métodos elétricos para caracterizar uma barragem de rejeito de calcário em São Paulo. A partir deste estudo, anomalias de baixa a alta resistividade foram detectadas e classificadas como ZBR (zona de baixa resistividade, com valores menores que 84 ohm.m), ZIR (zona de intermediária resistividade, com valores entre 84 a 500 ohm.m) e ZAR (zona de alta resistividade, com valores acima de 500 ohm.m, chegando próximo a 3000 ohm.m em algumas regiões).

Da Rocha *et al* (2019) realizaram um estudo no qual o principal objetivo era desenvolver uma metodologia utilizando a geofísica como recurso complementar ao monitoramento de barragem de rejeito. Este estudo contou com as técnicas de GPR (*Ground Penetration Radar*) e da resistividade elétrica em 10 linhas paralelas realizadas em uma barragem localizada no Complexo Minerador de Tapira (considerada a maior mina de fosfato da América Latina), Minas Gerais.

Após o processamento desses dados, as zonas de resistividade foram classificadas como baixa (abaixo de 250 ohm.m) intermediária (entre 150 e 1.116

ohm.m) e alta (acima de 1.116, chegando até quase 7500 ohm.m nas camadas mais resistivas).

Malagutti Filho *et al* (2018) empreenderam uma pesquisa aplicando, dentre outras técnicas, o imageamento elétrico com medidas de resistividade e polarização induzidas em duas linhas de investigação no eixo de duas barragens de terra de pequeno porte localizadas no interior de São Paulo. Os resultados revelaram que as camadas poucos resistivas apresentavam valores inferiores a 120 ohm.mm e estariam relacionadas à infiltração de água acumulada a montante do barramento. Os 10 m iniciais, se referem a resistividade intermediária, com valores inferiores a 600 ohm.m, seguida por alta resistividade (solo e blocos de rocha), acima de 3000 ohm.

Os trabalhos acima citados apontam que as propriedades petrofísicas de um solo afetam não só a resistência e estabilidade como também influenciam a sua resposta geofísica. Nesse contexto, alguns estudos foram desenvolvidos com o objetivo de entender a relação entre a geotecnia e a geofísica. Consenza *et al*, 2006 compararam os resultados obtidos em ensaios geotécnicos de campo (CPT dinâmico e *vane test*) com tomografia de resistividade elétrica (ERT) e GPR (*Ground Penetration Radar*) a fim de estabelecer correlações. Com base no modelo geoeletrico proposto, o estudo confirmou que a tomografia de resistividade elétrica é um método eficiente para determinar a extensão da camada de argila em subsuperfície. No entanto não foi possível estabelecer uma relação direta entre o CPT e o ERT.

Desta forma, espera-se que os valores de resistividade apresentem significativas variações a depender do material que está sob investigação. Isto inviabiliza a determinação de um intervalo específico para as zonas de baixa, intermediária e alta resistividade, cabendo ao profissional que realiza a interpretação dos dados classificar essas zonas de acordo com os resultados obtidos, correlacionando, quando possível com o nível d'água da região.

A microssísmica convencional e passiva (interferometria sísmica) diferem entre si quanto à necessidade de fonte geradora de ondas sísmicas. Enquanto uma depende desta fonte geradora a outra faz uso de ruído sísmico para obter a mudança

de velocidade da onda. Ambas as metodologias vêm sendo aplicadas a diferentes técnicas de monitoramento. O resultado desses estudos será apresentado a seguir.

Paula (2020) realizou estudo em que foi possível confirmar o potencial preditivo do método de monitoramento a partir da microssísmica convencional. Neste trabalho, a macroruptura do talude de cava de mineração pôde ser prevista com a antecedência de 45 minutos através do registro de seis eventos microssísmicos que antecederam o evento principal.

Rinehart *et al* (2012) empregaram métodos geofísicos (microssísmica convencional, potencial espontâneo e tomografia *cross-hole*) para monitorar o processo de erosão interna ou infiltração de água em barragens ao longo do tempo. Durante a atividade na barragem, os dados correspondentes às três técnicas foram coletados e posteriormente comparados aos dados da barragem sem atividade e antes da trinca. Os resultados obtidos sugerem que esse estudo oferece uma ferramenta valiosa para monitorar barragens, possibilitando identificar previamente possíveis problemas de *piping*.

Rittgers *et al* (2014) propuseram um experimento de campo que ilustra a eficaz combinação entre a microssísmica convencional e o método de potencial espontâneo para identificar rotas preferenciais de fluxo ligadas à erosão interna em uma barragem. Esse estudo geofísico foi realizado durante um teste de falha na barragem Ijkdijk, em Booneschans, Holanda em 2012. Essa é uma barragem de teste de tamanho real utilizada para experimentos de campo. Durante o teste, foram registrados eventos de emissões acústicas e o desenvolvimento de uma anomalia potencial associada a infiltração e fenômenos de erosão interna, próximo ao dique a jusante da barragem. Posteriormente essa região apresentou múltiplos fluxos d'água, onde eventualmente a liquefação do aterro se desenvolveu. A partir desta pesquisa, os autores desenvolveram um algoritmo que tem o objetivo de localizar as emissões acústicas no espaço e no tempo. O estudo demonstrou que a combinação dessas duas técnicas leva a resultados mais acurados na investigação de fluxo de água subterrânea o que torna essa combinação uma ferramenta eficiente na detecção precoce dos processos de infiltração e *piping*, com geração de imagens e defeitos associados.

Nesta mesma barragem, em Booneschans (Holanda), Mooney *et al* (2014) conduziram um estudo em que a estrutura foi submetida a cargas simulando condições de maré e tempestade conhecidas por desencadear erosão interna em barragens reais. Os métodos geofísicos utilizados neste estudo foram a microsísmica convencional e o potencial espontâneo. Somado a estas técnicas, os autores também fizeram uso de sensoriamento remoto para verificar qualquer deformação em escala milimétrica que viesse a ocorrer. Esta pesquisa concluiu que as abordagens de monitoramento empregadas foram implantadas com sucesso, fornecendo informações valiosas em termos de distribuição espacial e temporal durante os sete dias de teste.

A interferometria sísmica tem sido empregada, ao longo do tempo, para monitorar diversas estruturas. Mainsant *et al* (2012) utilizaram esse método para monitorar um talude rico em argila nos Alpes Suíços, com apenas dois receptores e utilizando como fonte de ruído o vento nas árvores e do tráfego de veículos ao longo da estrada. Este talude é responsável por inúmeros deslizamentos, representando um risco grande. Devido às características desse material, os movimentos de massa são gerados devido ao aumento da poropressão, acarretando liquefação parcial ou completa.

De início a variação da velocidade era menor que 1%, no entanto ao longo do estudo, percebeu-se que a precipitação acumulada influenciava nos resultados depois de transcorridas cerca de 20h (tempo da infiltração da água no solo). Após inúmeras precipitações intensas, verificou-se que a queda de velocidade aumentou de 1% para 7% em apenas 4 dias, o que por fim, levou a ruptura do talude.

Oliver *et al* (2015) conduziram um experimento em uma mina subterrânea para investigar a resposta mecânica de um maciço rochoso a uma mudança brusca no estado de tensões. Para tal, utilizando o ruído sísmico ambiente, foi realizado monitoramento das variações de velocidade.

Imediatamente após as explosões realizadas no túnel, verificou-se uma queda na variação da velocidade, o que foi associado à deformação plástica. Passados 5 dias da explosão, a velocidade sísmica convergiu para uma nova linha de base (figura 1).

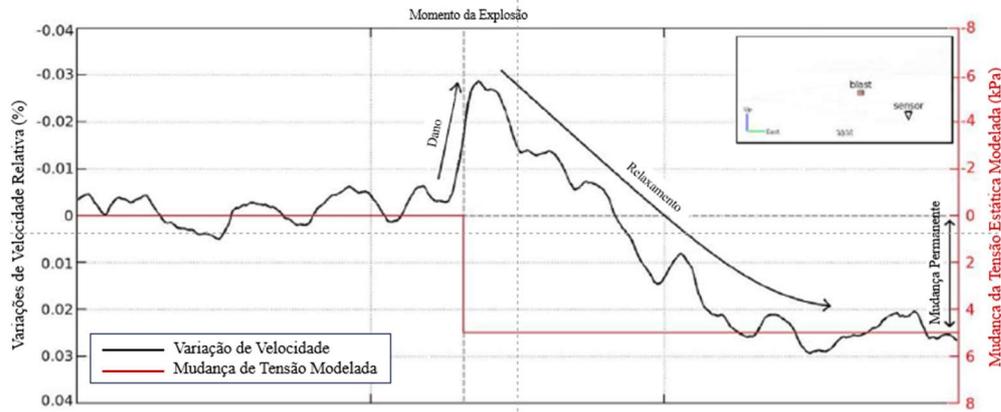


Figura 1: Variações de velocidade sísmica para um sensor. Como pode ser observado, após a explosão há uma nova linha de base da velocidade sísmica. Modificado de Olivier *et al.* 2015.

Planès *et al* (2016) construíram um modelo de talude em escala de laboratório (canal trapezoidal de 21,3 m de comprimento), entre duas caixas de entrada (montante e jusante) para abastecimento e recuperação de água, com paredes de compensado não erodível (figura 2). O material deste aterro corresponde a areia siltosa, com baixa plasticidade.

Nesta estrutura foram instalados 10 geofones, com 61 cm de espaçamento para monitorar as variações de velocidade, utilizando como fonte o ruído ambiente e embora não tenha sido especificado provavelmente este se deve a alta atividade de máquinas no local.

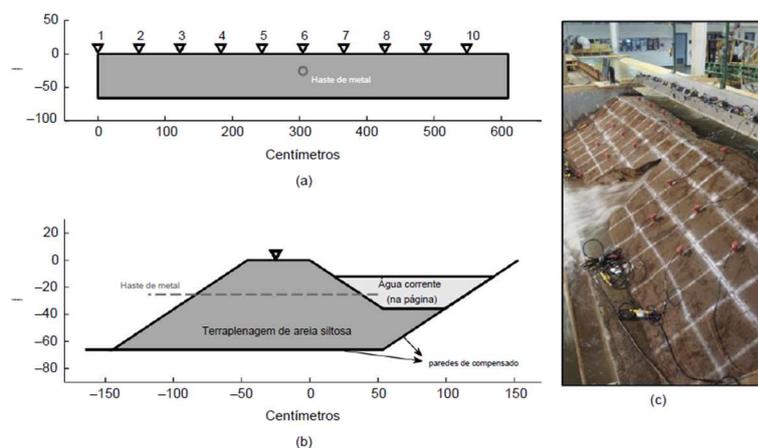


Figura 2: a) Vista frontal esquemática e (b) Vista em corte transversal do aterro do canal. Uma haste de metal de 1,3 cm de diâmetro foi embutida no meio da estrutura durante a construção, 25 cm abaixo da crista. Dez geofones de componentes verticais foram implantados na crista, com espaçamento de 61 cm. (c) Fotografia do aterro e quebra de fluxo, 5 h após o início do piping. Retirado de Planès *et al*, 2016.

Durante sua construção uma haste de metal com 1,3 cm de diâmetro foi inserida através do aterro, estendendo-se desde a face de água até a frente do talude, 25 cm abaixo da crista. Após o estabelecimento do fluxo de água, esta haste de metal foi puxada para induzir um processo de *piping*.

Nas 2,5 h iniciais a vazão foi medida por um medidor magnético, quando então, devido ao fluxo significativo, o cálculo precisou ser feito pela diferença de entrada e saída de água. Em 6,5 h, a erosão chegou até a crista do aterro e em 7 h o experimento precisou ser interrompido pois as bombas não conseguiram mais manter a vazão.

Como pode ser verificado na figura 3, os pares de geofones posicionados próximos ao *piping* registraram 20% de queda da variação de velocidade em 2 h de experimento. O método de monitoramento se mostrou eficaz, comprovando a influência da tensão efetiva na velocidade da onda, além de localizar a região em que o processo erosivo está em andamento.

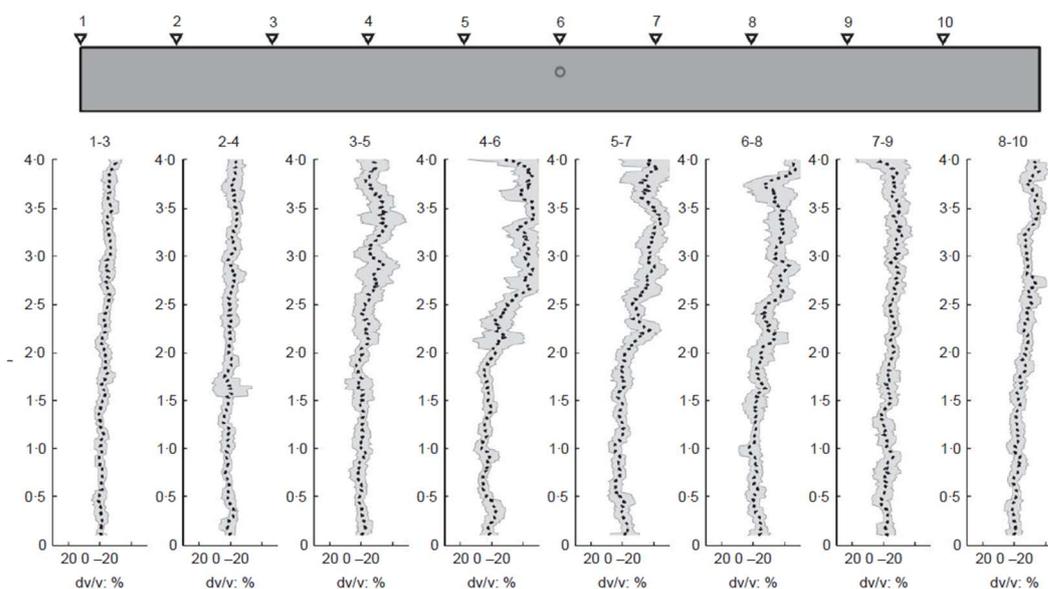


Figura 3: Mudanças de velocidade relativa para os pares de sensores de deslocamento de 1·2 m, ao longo das primeiras 4 h do experimento. A maior queda de velocidade (20%) é observada no centro da estrutura, onde se espera que o processo de *piping* influencie na variação da velocidade de onda. Retirado de Planès *et al*, 2015

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar que a geofísica, associada ao monitoramento convencional utilizado em barragens de rejeito, amplia a capacidade de caracterização do maciço.

Durante as obras de descaracterização das barragens 1A e 1B, eventuais processos de desestabilização poderão ocorrer e não ser identificados previamente pela instrumentação já que esta fornece informações pontuais. Nesse sentido, espera-se que os métodos geofísicos escolhidos (eletrorresistividade e microsísmica) permitam identificar tais processos logo no seu início, aumentando assim a segurança.

Os objetivos específicos dessa dissertação seguem listados abaixo:

- A partir das seções de eletrorresistividade, determinar se existem pontos de atenção que precisem ser monitorados com cuidado;
- Avaliar as condições de saturação do maciço;
- Discutir os valores de resistividade encontrados;
- Identificar, a partir de análise dos sismogramas, a causa dos alertas, qual a fonte do gatilho que excedeu os limites de aceleração estabelecidos;
- Quantificar, por relatório semanal, a relação dos eventos gerados durante o monitoramento microsísmico;
- Verificar a previsibilidade do sistema de monitoramento microsísmico por interferometria, se este será capaz de registrar mudanças nas condições do meio através da variação do percentual de velocidade.

1.3 Estrutura e Organização da Dissertação

Esta dissertação foi organizada em 6 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução. O tema da dissertação é introduzido, contextualizando o cenário atual no que tange a caracterização e monitoramento de barragens de rejeito no Brasil. Está subdividido em 3 subcapítulos, sendo que em um deles está indicando os objetivos deste trabalho;

- Capítulo 2: Barragem de Contenção de Rejeito. Apresenta um referencial teórico dos métodos construtivos de barragem de rejeito, o tipo de instrumentação que se espera encontrar em barragens de rejeito, bem como as investigações de campo utilizadas;
- Capítulo 3: Área de Estudo. Localiza e descreve a área de estudo, a geologia regional e local. Neste capítulo também está inserido o que se sabe sobre a barragem, o monitoramento geotécnico e os ensaios de campo executados;
- Capítulo 4: Metodologia. Descreve os métodos geofísicos utilizados nesta dissertação (Eletrorresistividade e Microsísmica) a partir do conhecimento existente sobre o assunto;
- Capítulo 5: Resultados e Discussões. Está dividido em duas partes, um referente à Eletrorresistividade e a outra à Microsísmica. Apresenta os resultados obtidos e os discute;
- Capítulo 6: Conclusões. Elenca as conclusões decorrentes deste estudo e algumas sugestões para estudos futuros.

2 Barragem de Contenção de Rejeito

Este capítulo se propõe a abordar o referencial teórico sobre barragens de rejeito, técnicas de disposição de rejeitos, métodos construtivos e as respectivas instrumentações.

Rejeito é o resultado dos processos de beneficiamento do minério, onde os minerais não desejáveis são removidos, a fim de aumentar a concentração do material desejado. Sendo assim, todo o material considerado sem valor econômico, é denominado rejeito e precisa ser disposto de alguma forma. Uma das técnicas utilizadas para a disposição desse material são as barragens.

Um dos fatores que caracterizam uma barragem de rejeitos é o alteamento em etapas, o qual acompanha o ritmo de lavra, sendo alteada à medida que os rejeitos são gerados. As técnicas que envolvem esse processo são denominadas em função da posição e direção de execução do alteamento, o qual pode ser executado com o material proveniente de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito do beneficiamento, desde que se atenda às necessidades técnicas do projeto (Cardozo *et al*, 2020).

A geometria dessas barragens depende da topografia local. Geralmente é implantada de forma a aproveitar os perfis de vales e deve possuir solo estável viabilizando a formação da lagoa ou em terrenos planos. É recomendável evitar sua construção sobre nascentes, já que a pressão da água pode comprometer a estabilidade do aterro (Machado, 2007).

Uma das razões que poderão gerar a instabilidade no talude de uma barragem diz respeito ao movimento da água através de um solo. Quando isso acontece ocorre uma transferência de energia da água para as partículas do solo. Essa energia é medida pela perda de carga e a força correspondente a energia é chamada força de percolação. A força de percolação transfere-se de grão a grão, no mesmo sentido do fluxo, podendo levar ao carreamento desses grãos.

A consequência do desenvolvimento das redes de percolação é conhecida como *piping*. O *piping* nada mais é que a erosão interna regressiva da barragem e pode causar o colapso total da estrutura. Este processo erosivo ocorre de jusante

para montante e segue caminhos preferenciais, como contato entre diferentes solos e juntas de estratificação. A intensidade do fluxo d'água se dá em função da condutividade hidráulica do solo.

O processo de erosão interna é um dos mais comuns em barragens de terra e pode ser evitado através da redução dos gradientes de saída. Assim, a jusante da barragem, é o local mais crítico, com gradientes mais elevados e níveis de tensão confinante mais baixos. Deve por isso, ser dada a devida atenção nesses locais através dos sistemas de monitoramento.

Outro fator preocupante em um monitoramento de uma barragem é o fenômeno da liquefação. De acordo com Rafael e Romanel (2014) o conceito de liquefação pode ser resumido como uma perda da resistência ao cisalhamento do material, induzidos por acréscimos de poropressão sob condições não drenadas. Os solos suscetíveis à liquefação apresentam a tendência de contração de volume sob cisalhamento, como as areias fofas.

O aumento significativo das poropressões, provoca uma redução substancial das tensões efetivas para valores concordantes à linha de ruptura. Assim, a parcela de solo sujeita a liquefação comporta-se temporariamente como uma massa fluida, com a consistência de um líquido viscoso (Albuquerque, 2004).

Os rejeitos de mineração em geral correspondem a material granulares, e/ou finos que, quando dispostos hidraulicamente, tendem a formar camadas de material de baixa densidade relativa, com alto grau de saturação, suscetíveis à liquefação pela aplicação de carregamentos não drenados (Rafael e Romanel, 2014).

2.1 Métodos Construtivos

Existem três diferentes métodos de alteamento, são eles: Método a Jusante; Método a Montante; Método da Linha Centro. Em qualquer um desses métodos, a contenção desses rejeitos é feita por barramentos projetados com um dique de partida de material de baixa permeabilidade. Sob o dique de partida, usualmente tem-se uma trincheira tipo *cut-off*, cuja vedação poderá ser total ou parcial. O material utilizado na construção desse dique é geralmente argiloso, de forma a

resultar em uma zona impermeável, livre de concentrações localizadas de percolação (Machado, 2007).

2.1.1 Método a Jusante

Após a construção do dique de partida, iniciam-se os alteamentos sucessivos dos rejeitos no sentido a jusante desse dique, até que seja atingida a cota de projeto. O dique de partida precisa ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante). Cada avanço da barragem é feito sempre a jusante do rejeito depositado anteriormente (Figura 4).

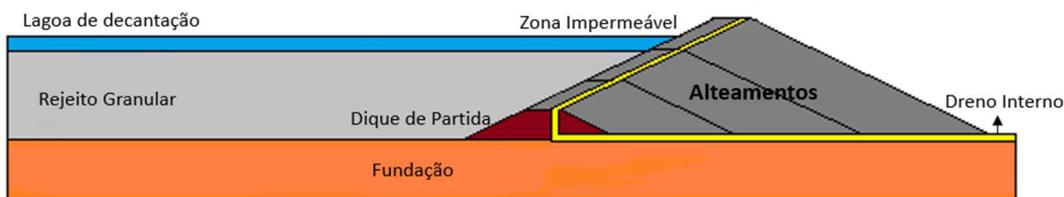


Figura 4: Método construtivo a jusante. Retirado de Albuquerque (2004).

De acordo com Albuquerque (2004) esse método foi desenvolvido devido à necessidade de que os alteamentos sucessivos não fossem executados sobre o rejeito previamente depositado e pouco consolidado. Com isso, essas barragens apresentam maior porte, com fatores de segurança mais satisfatórios.

Segundo Chammas (1989) uma das vantagens do alteamento a jusante está na sua resistência a carregamentos dinâmicos, já que é possível escalonar a construção sem interferir na segurança, facilita a drenagem, possui baixa susceptibilidade de liquefação e simplicidade na operação.

Machado (2007) aponta que esse tipo de alteamento possibilita um maior controle do lançamento do rejeito e da compactação do alteamento, além de permitir o controle das forças de percolação, com o alteamento do material menos permeável a montante. As forças de percolação se dissipam dentro desse material menos permeável, a uma distância segura na face de jusante.

A principal desvantagem é que esse método requer alto investimento financeiro, já que necessita de maiores volumes de material e de grandes quantidades de rejeito nas primeiras etapas de construção. Além disso, a área a ser

ocupada é maior, com talude bastante abatido. Como o alteamento é feito para jusante, toda a instrumentação precisa ser deslocada.

2.1.2 Método a Montante

A etapa inicial da construção de uma barragem a montante consiste na execução de um dique de partida, os rejeitos então são lançados a montante, desde a crista do dique de partida, formando assim uma praia. Essa praia servirá, no futuro, como fundação para a construção de um novo alteamento. A sequência de alteamentos é então realizada ao longo da vida da barragem, até atingir a cota de projeto (figura 5).

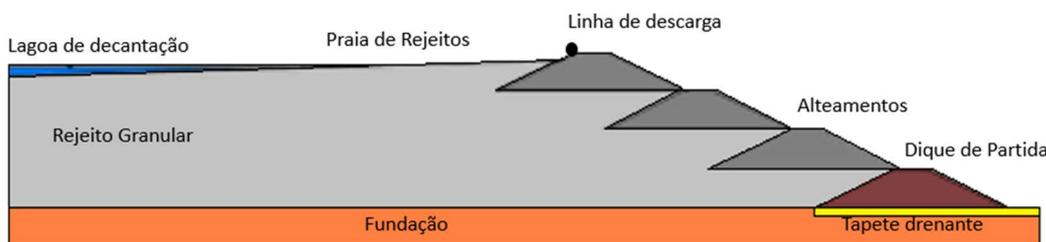


Figura 5: Método construtivo a montante. Retirado de Albuquerque (2004).

De acordo com Araújo (2006) essa é a técnica de construção mais antiga, simples e econômica. O seu baixo custo, o volume de material utilizado é menor e a rapidez na execução faz com que seja utilizado pela maioria das mineradoras.

Segundo Albuquerque (2004) embora esse método construtivo seja bastante popular, existe um agravante quando se trata de segurança. Diversos são os fatores que contribuem para essa questão e dentre eles, podemos citar:

- Os alteamentos são realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados, tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação sob carregamentos dinâmicos ou estáticos;
- Dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem;
- Baixo controle durante a construção;
- Devido à pequena distância entre a lagoa de decantação e o talude de jusante, há maior possibilidade de ocorrerem rupturas por *piping*.

Os acidentes envolvendo essas estruturas ocorridos no Brasil nos últimos 5 anos levaram a Agência Nacional de Mineração a proibir a construção ou o alteamento pelo método a montante (resolução ANM no 04/2019). Além disto, passou a proibir as mineradoras responsáveis por barragens de mineração, independentemente do método construtivo, de manter ou construir instalações com presença humana nas zonas de autossalvamento (ZAS) envolvendo:

- qualquer instalação, obra ou serviço, permanente ou temporário, que inclua presença humana, tais como aqueles destinados a finalidades de vivência, de alimentação, de saúde ou de recreação; e;
- barramento para armazenamento de efluente líquido imediatamente a jusante de barragem de mineração, onde aquele tenha potencial de interferir na segurança da barragem ou possa submergir os drenos de fundo ou outro sistema de extravasão ou de segurança da barragem de mineração à montante desta.

As barragens também devem contar com um sistema automatizado para o acionamento de sirenes nas ZAS, em local seguro e dotado de modo contra falhas em caso de rompimento da estrutura. Com relação às barragens a montante que estão inativas ou em operação, a resolução impõe o seu descomissionamento ou descaracterização.

2.1.3 Método Linha de Centro

Esse método construtivo nada mais é que uma variação do método a jusante no qual o alteamento da crista é realizado de forma vertical. Essa técnica pode ser considerada como uma solução geometricamente intermediária entre os métodos já citados. O primeiro alteamento é executado lançando-se o aterro sobre o limite montante da praia e o talude de jusante do maciço do dique de partida. Os alteamentos subsequentes são coincidentes ao eixo durante toda a vida útil da barragem (figura 6).

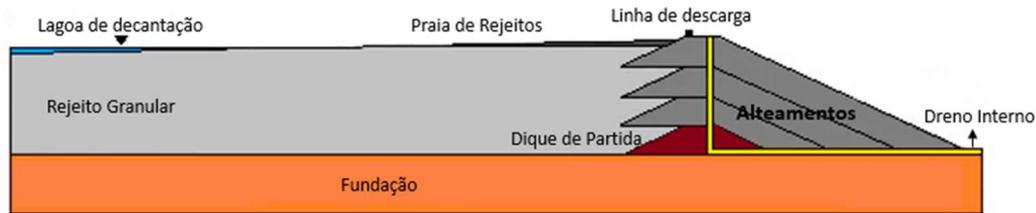


Figura 6: Método construtivo linha de centro. Retirado de Albuquerque (2004).

A exigência de menores quantidade de volume de material e a facilidade construtiva, torna essa técnica bastante atraente. Além disso, segundo Assis e Espósito (1995) é possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que permite o controle da linha de saturação e promove a dissipação de poropressões, tornando assim, o método mais apropriado para ser construído inclusive em áreas de alta sismicidade.

Como desvantagem, Lozano (2006), aponta que há a necessidade de sistemas de drenagem eficientes, assim como sistemas de contenção a jusante, já que a saturação do rejeito compromete a estabilidade do maciço. Devido à complexidade da operação, os investimentos poderão ser altos.

2.2 Instrumentação

De acordo com a lei nº 12.334/2010, a segurança de uma barragem visa a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. Neste documento está determinado que é responsabilidade do empreendedor a segurança da estrutura e, no caso de barragens de rejeito, o órgão fiscalizador é a ANM.

Como já foi abordado, inúmeros são os processos que levam à instabilidade de uma barragem. Desta forma, torna-se indispensável o monitoramento de alguns parâmetros, como poropressão, pressões totais, recalques, deslocamentos horizontais, cargas de tensão nos elementos estruturais, vazões de drenagem etc.

Silveira (2006) aponta que antes de indicar os métodos de medição, deve ser feita uma lista das questões geotécnicas que possivelmente surgirão durante as fases de projeto, construção ou operação. Toda barragem possuirá pontos suscetíveis a problemas, de diferentes naturezas e requerem instrumentação específica. A escolha

dos instrumentos deve refletir os comportamentos previsíveis da barragem e de sua fundação.

Além da definição do tipo de instrumento e onde os mesmos deverão ser instalados, é necessário que haja constante preocupação com o seu correto funcionamento, se estão visivelmente operacionais e se os dados por eles fornecidos são confiáveis. A periodicidade das leituras também precisa ser definida de forma a garantir a segurança da barragem. Em períodos de chuva, por exemplo, possivelmente determinados instrumentos deverão ser lidos em intervalos menores de tempo.

Uma vez que a resistência e deformação do solo é controlada pela tensão efetiva, a medição da poropressão é de extrema importância. Assim, determinar a posição da superfície freática e de toda a rede de percolação se faz indispensável. Os instrumentos que irão fornecer tais informações são os medidores de nível d'água (INA) e, em particular, os piezômetros.

Os INAs são os instrumentos mais simples utilizados e a sua função é indicar o nível do lençol freático. Para tal, um tubo (em geral PVC) é perfurado e envolto por um material filtrante e outro drenante. Durante a sua instalação é aplicado um selo, entre a parede do furo e o tubo, próximo à superfície do terreno. A parte aflorante do tubo de PVC é envolta por um marco de concreto.

Além dos INA's, outros instrumentos também podem fornecer a cota do nível d'água. Esses são os poços de monitoramento (PM) e furos de sonda (DH).

As leituras são realizadas através de um cabo graduado, de sensor elétrico na extremidade com emissor sonoro. Ao encontrar o nível d'água, o sensor apita e com auxílio do cabo graduado é possível saber a posição do nível freático.

Eventualmente tais instrumentos podem ficar inoperantes devido a obstruções no tubo (queda de objetos em seu interior, obstrução causada por cisalhamento no interior do maciço, colmatação dos orifícios do tubo ou material drenante).

Os piezômetros (PZ) podem ser considerados os instrumentos mais importantes para a segurança das barragens e por isso existem inúmeros tipos. Além

da carga de pressão ou piezométrica, eles permitem a definição da carga total atuante em um dado ponto do maciço e, com isto, uma avaliação da direção e sentido de fluxo além de poderem atuar, em conjunto ou não com os INA's, como elementos de alerta envolvendo aspectos de estabilidade do maciço. A determinação de qual modelo de instrumento é mais adequado, dependerá das circunstâncias de monitoramento (medições de pressões contínuas, medidas estáticas ou dinâmicas, localização do instrumento em relação ao terminal de leitura, entre outras). Os principais modelos são: tubo aberto, pneumático, hidráulico, elétrico e corda vibrante (Machado, 2007).

2.3 Investigações de Campo

A investigação de campo é mais um recurso que viabiliza o a identificação do perfil de solo, incluindo profundidade das camadas e sua espessura, mudança de granulometria, posição do nível d'água etc. Nesse aspecto, ensaios de campo, como piezocone, têm muito a contribuir em um estudo de estabilidade de barragens.

O ensaio de piezocone, mais conhecido como CPTu (*piezocone penetration test*), consiste na cravação no solo de uma ponteira cônica, a uma velocidade constante, obtendo assim continuamente medidas de resistência a penetração (q_c), de atrito lateral (f_s) e poropressão (u). Um fator de correção é aplicado a q_c para se obter a resistência real mobilizada (q_t), já que esta medida é influenciada pelas poropressões atuando em áreas desiguais na geometria do cone (Perini, 2021).

As medidas obtidas são representadas em gráficos mostrando o comportamento do solo ao longo da profundidade investigada. Para interpretá-los deve-se considerar que baixos valores de q_t associados a geração de excesso de poropressão correspondem a materiais compostos principalmente por argilas, assim como o aumento da resistência de ponta, acompanhados por valores de poropressão próximos a poropressão de equilíbrio estático (u_0), caracterizam presença de areia.

A partir dos dados obtidos no ensaio de CPTu é possível estimar parâmetros geotécnicos de resistência considerando o tipo de drenagem a que o solo está submetido. No caso de solos argilosos, resistência ao cisalhamento não drenada (s_u) e para solos arenosos, ângulo de atrito efetivo. Na condição não drenada, a análise

é feita em termos de tensão total e na condição drenada, em termos de tensões efetivas (Perini, 2021).

Geralmente rejeitos de minério são formados por materiais siltosos o que lhes conferem permeabilidades intermediárias entre argilas e areias. Durante a cravação do cone, a uma velocidade padronizada, a permeabilidade característica corresponde a uma permeabilidade parcial. Essa condição pode levar a uma interpretação errônea dos parâmetros geotécnicos (Bedin, 2006).

3 Área de Estudo

A área de estudo (figura 7) está localizada a aproximadamente 20km do município de Catalão (GO), dentro das instalações de uma mineradora, cuja área corresponde a 413,78 km².

O clima da região é caracterizado como tropical de altitude, com duas estações bem-marcadas, uma seca (entre maio e setembro) e outra chuvosa (de outubro a abril). A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1500mm.

A mineradora extrai e beneficia o minério de nióbio, transformando-o em liga de ferro-nióbio. Os rejeitos gerados após o beneficiamento são depositados em uma grande bacia de formato poligonal. Esta grande bacia é compartimentada em quatro bacias menores, designadas como 1A, 1B, 2A e 2B.

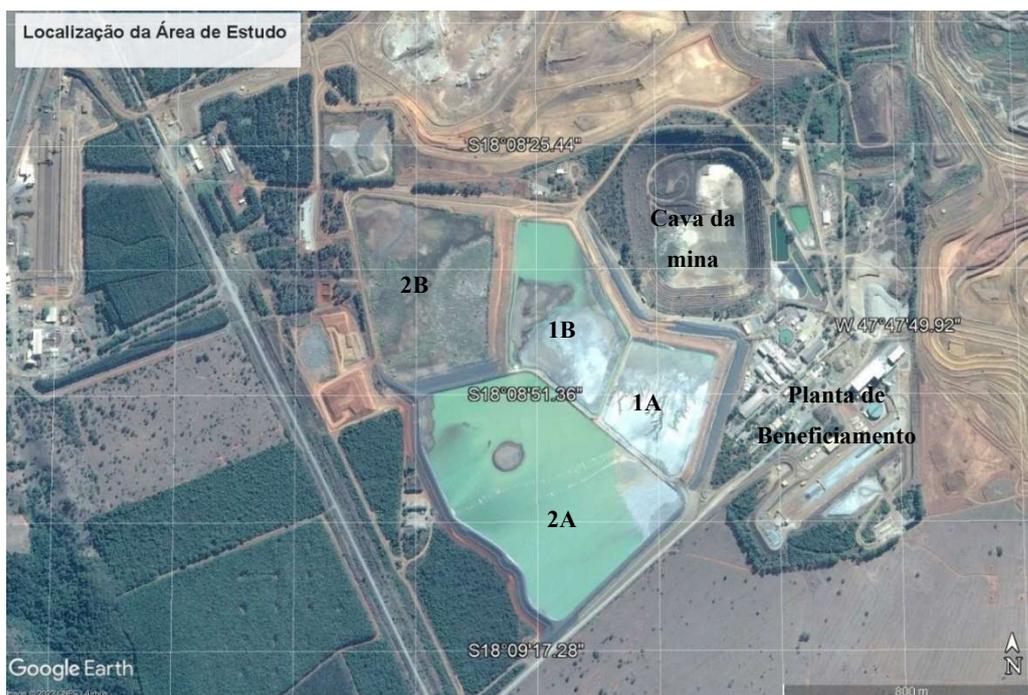


Figura 7: Localização da área de estudo. Fonte: Google Earth.

Os processos de beneficiamento de nióbio geram cinco tipos de rejeitos do ponto vista físico-químico. A fração granulométrica predominante é areia e as densidades específicas dos grãos variam entre 2,9 e 4,6 g/cm³.

Em 2019 o Ministério Público de Goiás solicitou o descomissionamento e descaracterização das barragens 1A e 1B, já que estas possuem um alto dano potencial associado. Independente da probabilidade de ocorrência de ruptura,

podem ocorrer perdas de vidas humanas, além de danos sociais, econômicos e ambientais.

De acordo com o site do Ministério público de Goiás, caso haja o rompimento das barragens, a onda de rejeito atingiria o vale a jusante, onde há um córrego, alcançando cerca de 6 km de distância (figura 8, mapa de inundação).



Figura 8: Mancha de inundação para o caso do rompimento das barragens 1A e 1B. Retirado do SIGBM (Sistema de Gestão de Barragem de Mineração, Cadastro Nacional, site ANM).

A descaracterização das barragens 1A e 1B foi planejada para ocorrer em 4 etapas, são estas:

Etapa 1

- Instalação do Canteiro de obras / acessos construtivos e operacionais;
- Remoção de interferências (tubulações, canaletas e instrumentação);
- Instalação da instrumentação de monitoramento de segurança das barragens durante a obra de descaracterização;

Etapa 2

- Execução da escavação dos taludes e novos acessos construtivos/operacionais;

- Execução da regularização do reservatório, direcionando os escoamentos superficiais;
- Execução do revestimento dos taludes escavados com solo compactado;

Etapa 3

- Regularização da Crista das barragens 2A e 2B
- Execução do canal de topo CT-01 para escoamento superficial;
- Execução do revestimento do reservatório e do canal de topo CT-01 com solo compactado;
- Execução dos canais de drenagem superficial, com a descida da água em degraus, canal a jusante e canal periférico CP-01;

Etapa 4

- Revestimento vegetal dos taludes e reservatório.

Ao fim das etapas supracitadas, a visão geral das barragens segue apresentada na figura 9.



Figura 9: Visão geral das barragens 1A e 1B em processo de descaracterização. Retirado de Google Earth.

3.1 Aspectos Geológicos

O estudo dos aspectos geológicos nos leva a compreender a origem litológica da área de estudo, através de sucessivos eventos históricos evolutivos que transformaram a região, que nesse caso, está inserida na Província Carbonatítica do Alto Parnaíba.

De acordo com Gomes *et al* (2018) a importância econômica dos carbonatitos no Brasil é resultado do intenso intemperismo das rochas alcalinas, de composição ultrabásica e carbonática. O produto desse processo corresponde a solos lateríticos, que podem atingir 200 m de espessura.

3.1.1 Geologia Regional

Considerada um importante distrito mineral em função dos depósitos de nióbio e fosfato (em exploração) além de recursos ainda não explorados como titânio, vermiculita e terras raras, a província Carbonatítica do Alto Parnaíba se estende por 25.000 km², entre o sul de Goiás e oeste de Minas. Está localizada entre a margem nordeste da bacia do Paraná a margem sudeste do Cráton de São Francisco (figura 10). Suas rochas estão encaixadas nas unidades neoproterozóicas da Faixa Brasília (Silva, 2019).

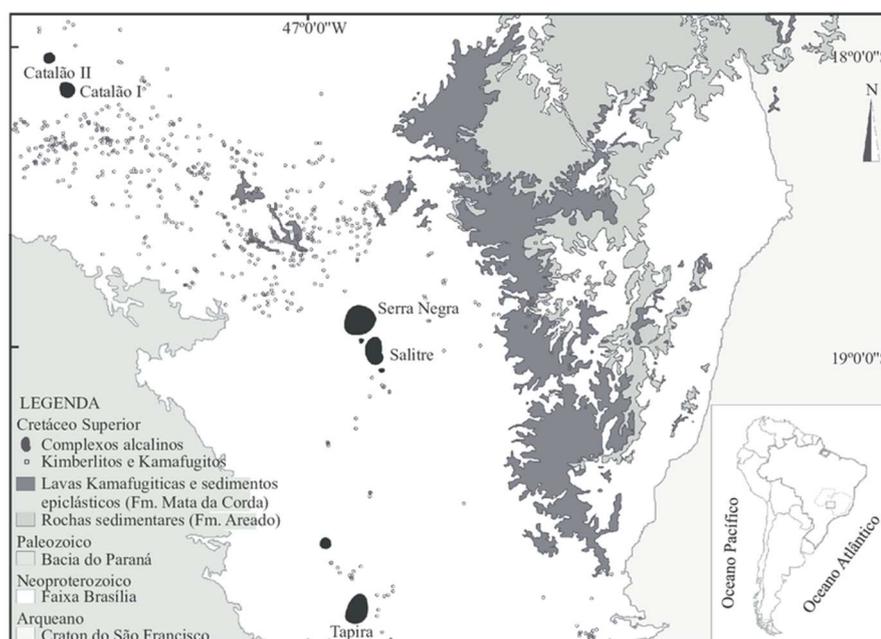


Figura 10: Mapa geológico da Província Ígnea do Alto Parnaíba. Retirado de Silva, 2019.

A região é caracterizada como planalto profundamente dissecado, composto por rochas metassedimentares e metavulcânicas proterozóicas, da Faixa Brasília (Grupo Araxá). Esses metassedimentos compreendem em micaxistos de granulação grossa, associados a um relevo levemente ondulado e quartzitos, alongados, seguindo um alinhamento (NW/SE), destacando-se no terreno através de elevações. As rochas metavulcânicas garantem um relevo bem mais acidentado, com vales profundos e correspondem a filitos e sericita-xistos finos (Palmieri, 2011).

De acordo com Brod, *et al* (2004) são reconhecidos nessa província sete complexos alcalino-carbonátitos: dois em Goiás (Catalão I e II) e cinco em Minas Gerais (Salitre I e II, Serra Negra, Araxá e Tapira). A maioria desses complexos, desenvolveu uma cobertura de solo muito espessa, causada devido ao intemperismo tropical e padrões de drenagem centrípeta a partir de encaixantes mais resistentes. Esse contexto favoreceu a concentração econômica de fosfato, nióbio e titânio (Ribeiro, *et al* 2001).

3.1.2 Geologia Local

A área de estudo encontra-se inserida no Complexo Catalão I que corresponde a uma intrusão multifásica, aproximadamente circular, com 6km na direção N-S e 5,5 km na direção E-W.

A intrusão do complexo provocou uma deformação dômica dos xistos e quartzitos encaixantes fenitizados, com aproximadamente 30km², do Grupo Araxá. O centro do complexo é dominado por um corpo carbonatito, enquanto as porções externas correspondem a rochas ultramáficas alcalinas. Há ocorrência de diques e veios, com até 5m de espessura, o que contrasta com as espessuras desses corpos no restante da província (figura 11, Silva, 2019 e Palmieri, 2011).

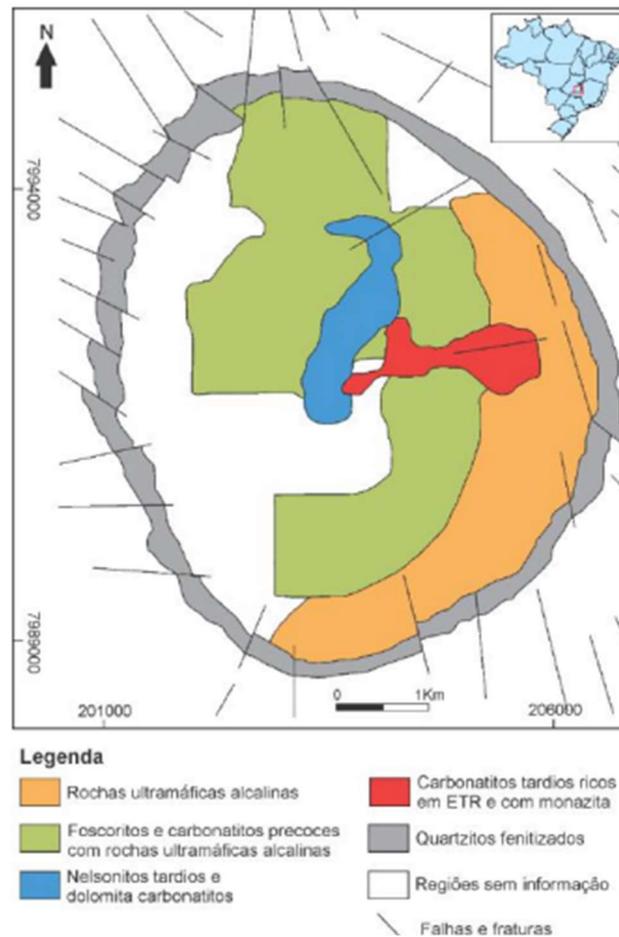


Figura 11: Esquema geológico do complexo carbonatítico de Catalão I, retirado de Silva, 2019.

O domo formado é truncado pela superfície de aplainamento e está preservado devido a um anel de quartzito em torno do corpo ígneo. A ação do intemperismo sobre as rochas alcalinas foi intensa, o que possibilitou a formação da cobertura de solo de até 250m de espessura.

As feições geomorfológicas são pouco expressivas, com apenas pequenas elevações irregulares, formadas por cangas ricas em magnetita.

Os depósitos de fosfato e nióbio de Catalão I, estão relacionados aos foscoritos e nelsonitos tardio (série foscorítica), já os depósitos de terras raras estão relacionados aos carbonatitos tardios (Ribeiro 2008; Ribeiro *et al.* 2014).

3.2 Descrição das Barragens

De acordo com as plantas do Projeto de Descaracterização das Barragens 1A e 1B (figura 12 e 13), os barramentos foram construídos a montante sobre aloterito

(vermelho e amarelo) e isalterito. O material que compõe os diques corresponde a solo compactado, seguido de um aterro de magnetita.

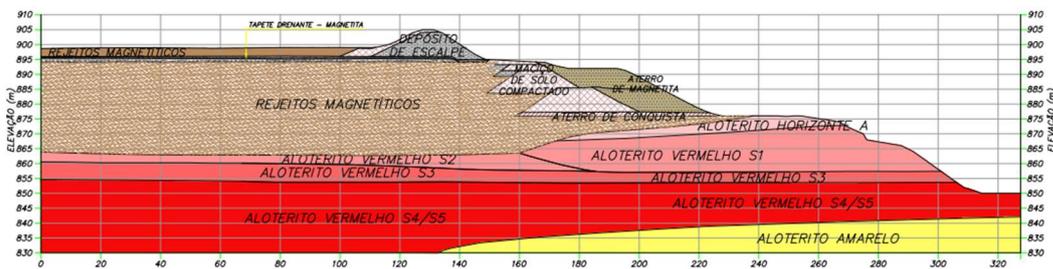


Figura 12: Descrição da barragem 1A.

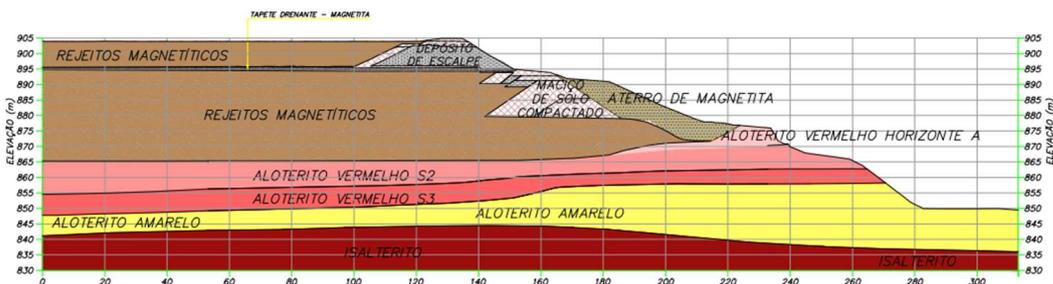


Figura 13: Descrição da Barragem 1B.

3.2.1 Monitoramento Geotécnico

Antes do início das obras de descaracterização o monitoramento das barragens 1A e 1B era realizado por 12 indicadores de nível d’água (INA’s), 52 piezômetros (PZ e PZE), 6 poços de monitoramento (PM) e 1 furo de sonda (DH). A localização destes instrumentos está indicada na figura 14.

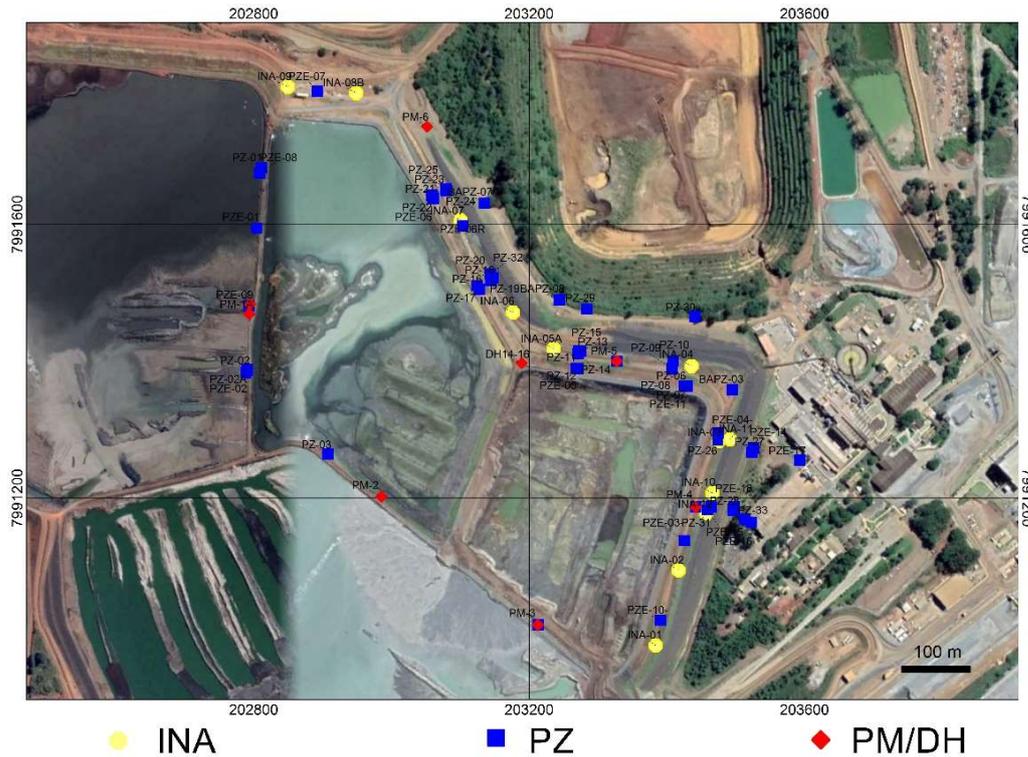


Figura 14: Distribuição dos instrumentos de monitoramento das barragens 1A e 1B. Os indicadores de nível de água (INA) estão representados em azul claro, os piezômetros (PZ) em azul, e os poços de monitoramento e furo de sondagem (PM e DH) em lilás. Fonte da imagem: Google Earth, coordenadas UTM, WGS 84.

Como o levantamento geofísico foi realizado em maio de 2022, no processamento das seções foram utilizadas somente as leituras dos instrumentos obtidas próximas à data do levantamento, descartando as anteriores. Para a modelagem, optou-se em separar a superfície freática adquiridas a partir dos INA's, PM e DH (já que estes indicam a cota do nível d'água, figura 15) das leituras obtidas a partir dos piezômetros (figura 16).

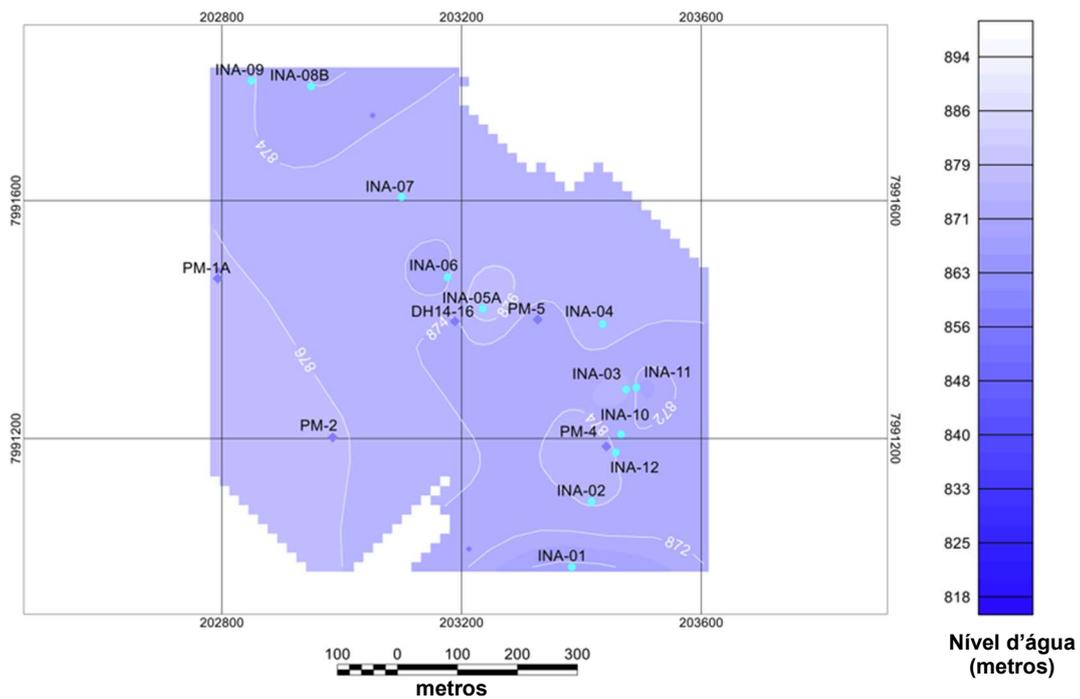


Figura 15: Superfície do lençol freático criada a partir dos instrumentos que medem o nível d'água (INA's, PM's e DH).

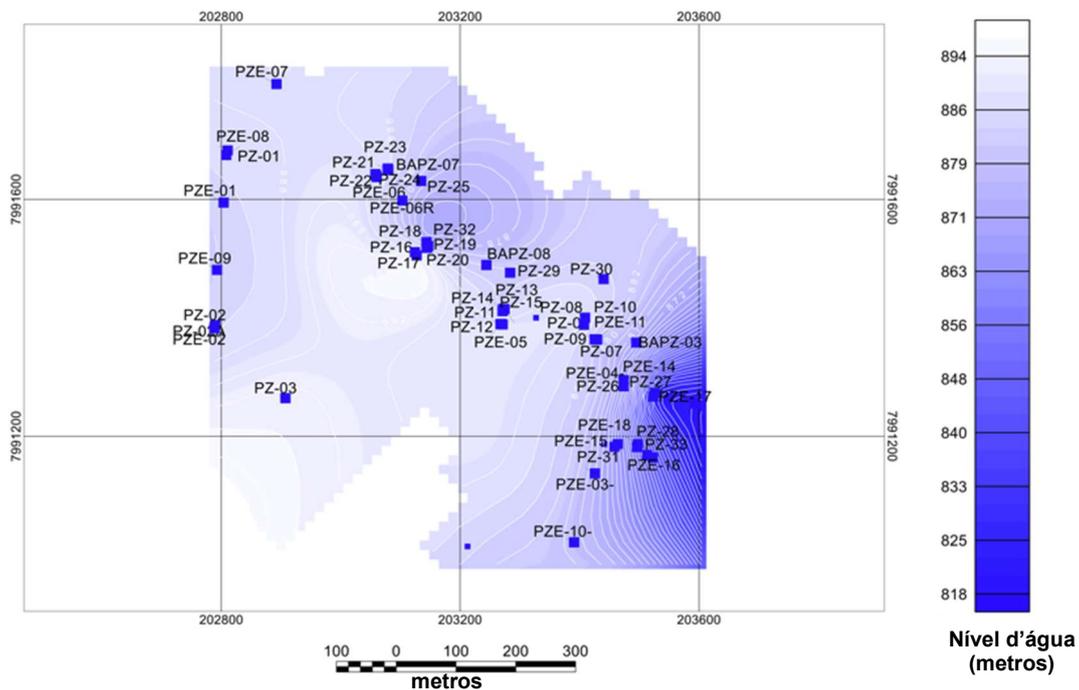


Figura 16: Superfície criada a partir das leituras obtidas pelos piezômetros.

O que se observa na figura 15 é que na época da campanha geolétrica, havia uma homogeneidade da superfície freática modelada, indicando uma concordância no nível d'água medido pelos respectivos instrumentos. O mesmo não aconteceu na

figura 16, já que a superfície modelada considerando as leituras dos piezômetros apresentou variação entre as leituras, o que possivelmente indica fluxo de água.

Devido às obras de descaracterização ocorrerão mudanças na instrumentação existente (alguns instrumentos serão retirados). Uma nova instrumentação será implementada na barragem 1B e a sua locação proposta segue apresentada na figura 17.

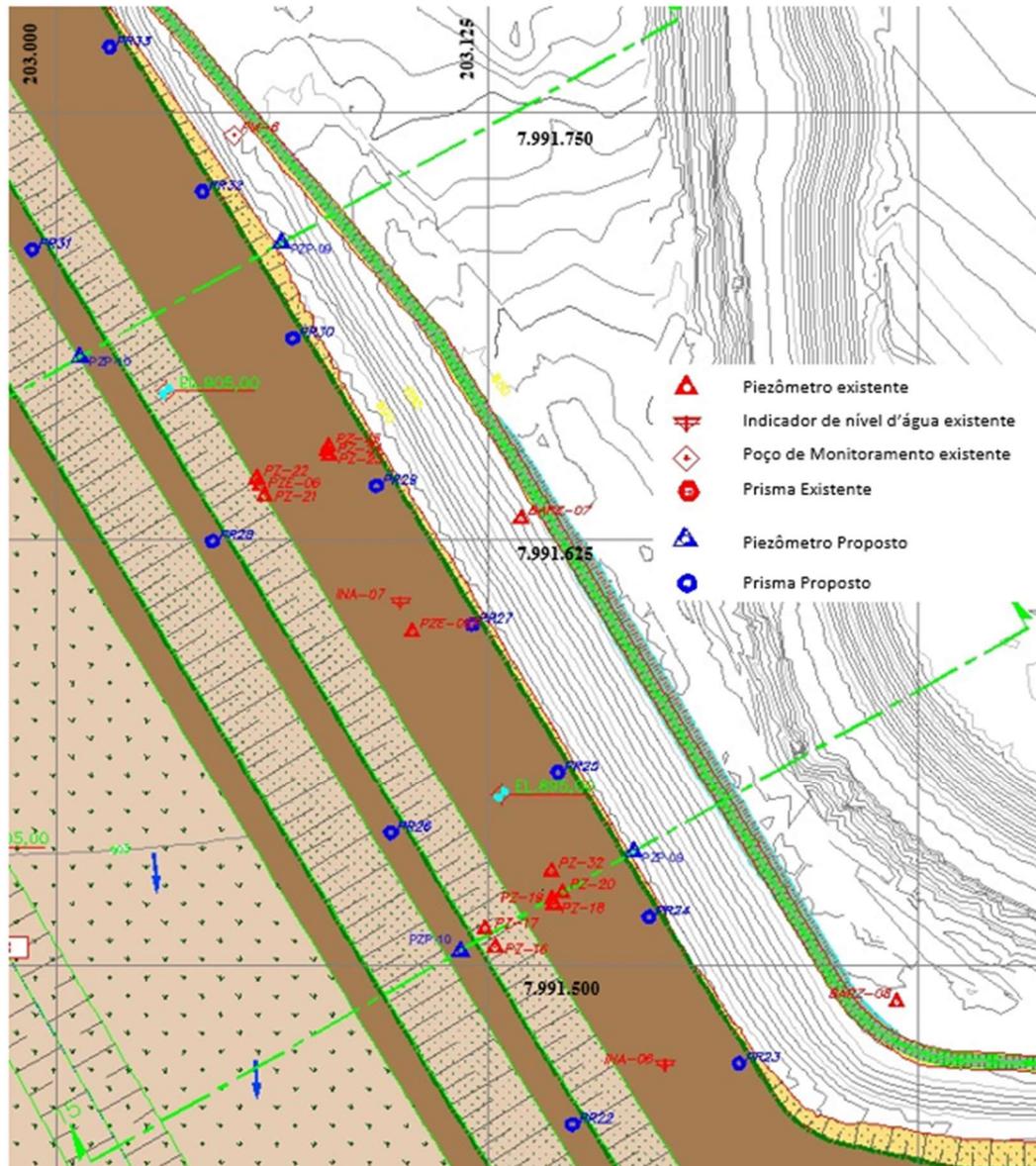


Figura 17: Instrumentação existente e proposta da barragem 1B.

3.2.2 Investigações de Campo

Durante os anos de 2019 e 2020 foram realizados ensaios de CPTU nas barragens 1A e 1B (8 na barragem 1A e 9 na 1B). A locação desses ensaios está indicada na figura 18.



Figura 18: Distribuição dos CPTU's executados. Fonte: Google Earth.

Essa campanha teve como objetivo descrever de forma detalhada a estratigrafia do subsolo de maneira contínua, enquanto se obtém medidas de atrito lateral (f_s), resistência de ponta (q_c) e da poropressão gerada. Em algumas profundidades a cravação foi interrompida, para a realização do ensaio dissipação da poropressão.

A tabela 1 apresenta as profundidades alcançadas de cada ensaio CPTU realizado, bem como a profundidade dos ensaios de dissipação de cada ensaio.

Tabela 1: Profundidades executadas dos ensaios de CPTu

	CPTU	Dissipação (m)	Profundidade (m)
Barragem 1ª	CPTU-1A-001	31,43 e 39,29	53,55
	CPTU-1A-004	28,95 e 37,76	50,03
	CPTU-1A-005	7,93; 9,22 e 17,01	19,57
	CPTU-1A-007	33,38 e 41,49	50,03
	CPTU-1A-008	20,29; 28,61 e 38,16	40,69
	CPTU-1A-009	34,10 e 38,35	49,79
	CPTU-1A-012	18,04 e 43,12	46,03
	CPTU-1A-014	31,68	40,89
Barragem 1B	CPTU-1B-002	26,56 e 28,10	39,03
	CPTU-1B-003A	23,36 e 24,94	51,40
	CPTU-1B-011	19,82 e 24,28	27,11
	CPTU-1B-012	-	22,29
	CPTU-1B-013	20,15	34,67
	CPTU-1B-014	-	27,11
	CPTU-1B-015	11,10; 16,54; 23,89 e 27,39	31,31
	CPTU-1B-016	13,21	20,96
	CPTU-1B-017	36,03	41,22

Optou-se por apresentar aqui, apenas os ensaios de CPTu realizados próximos as linhas de eletrorresistividade executadas na barragem 1B. Assim, serão apresentados a seguir os seguintes ensaios: CPTU-1B-002, CPTU-1B-003A e CPTU-1B-015 (linha T9) e CPTU-1B-017 (linha T10), de acordo com as figuras 19, 20, 21 e 22 respectivamente.

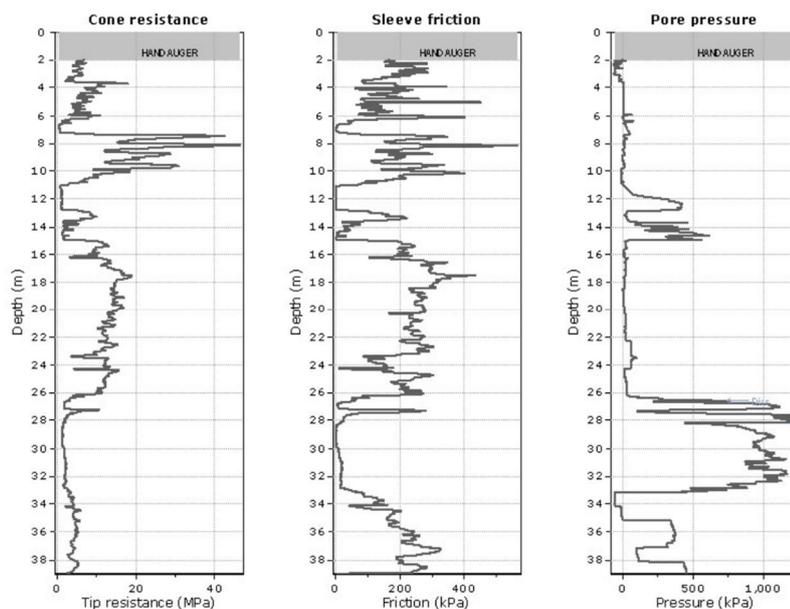


Figura 19: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-002.

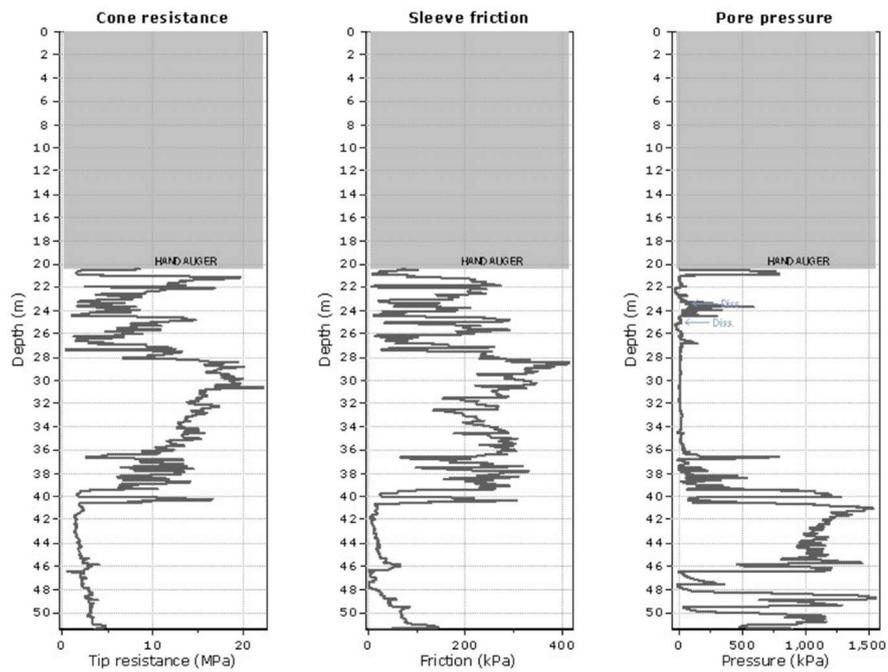


Figura 20: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-003A.

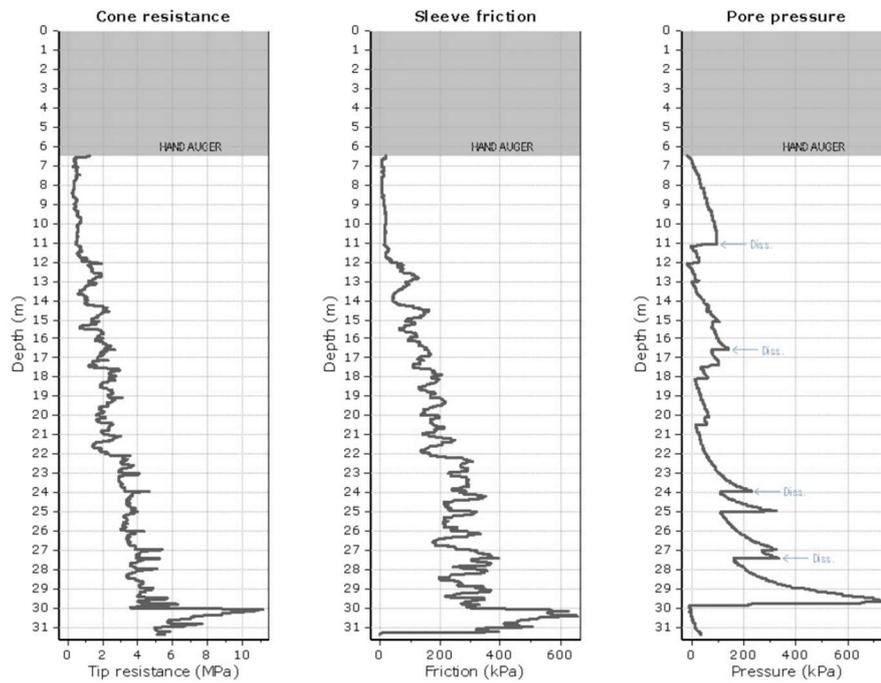


Figura 21: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-015.

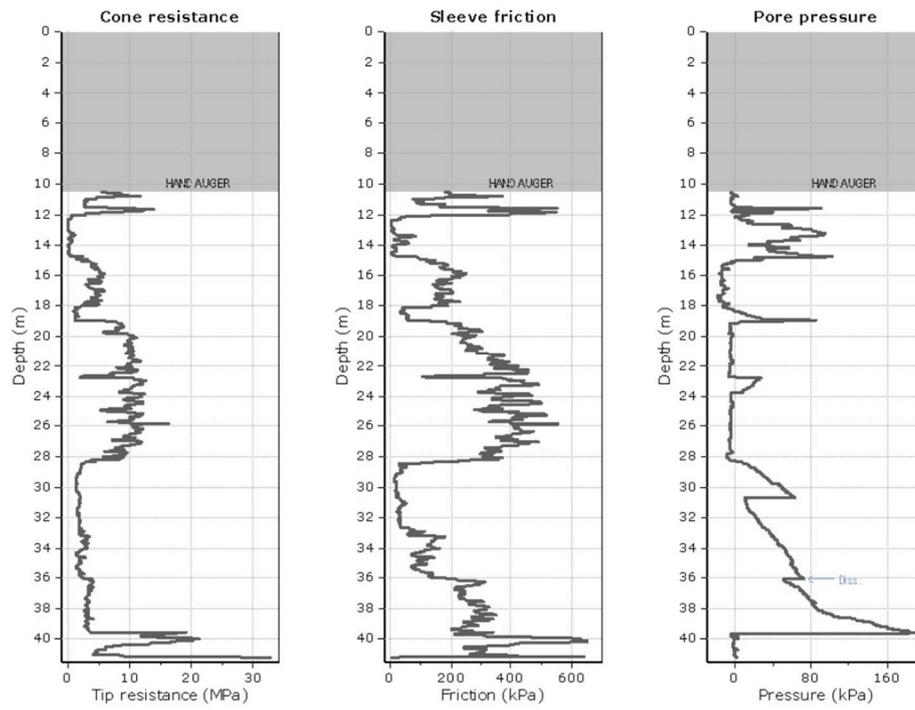


Figura 22: Gráficos obtidos a partir do ensaio de CPTU-1B-017.

4 Metodologia

Nesta dissertação foram utilizados o método de Eletrorresistividade na barragem 1B, e Microssísmica (convencional e passiva) nas barragens 1A/1B e 2A/2B. A partir dos dados coletados foram realizadas interpretações, correlacionando, quando possível com a instrumentação (medidores de nível d'água e piezômetro) e ensaios de campo (CPTu).

4.1 Eletrorresistividade

Dentre os métodos geofísicos rasos, aqueles que se restringem a estudar a parte superior da crosta terrestre, podemos destacar os métodos geoeletricos. Estes se fundamentam em campos elétricos e eletromagnéticos e se propõem investigar as propriedades elétricas dos materiais, tais como resistividade, permeabilidade magnética, constante dielétrica, entre outros.

Os métodos geoeletricos se dividem em eletrorresistividade, polaridade induzida, potencial espontâneo, radar de penetração e eletromagnético. Com exceção do método potencial espontâneo, todos são artificiais, ou seja, o campo físico é criado por meio de equipamentos.

Amplamente utilizada, a eletrorresistividade tem como princípio a determinação da resistividade elétrica do meio, através da condução da corrente elétrica do solo a partir de eletrodos dispostos na superfície do terreno (figura 23). Cada arranjo é composto por 4 eletrodos que são cravados na superfície do terreno. Um par é responsável por induzir a corrente elétrica (A e B), enquanto o outro é utilizado para medir a diferença de potencial que se estabelece (M e N), resultado da passagem dessa corrente (Braga, 2016).

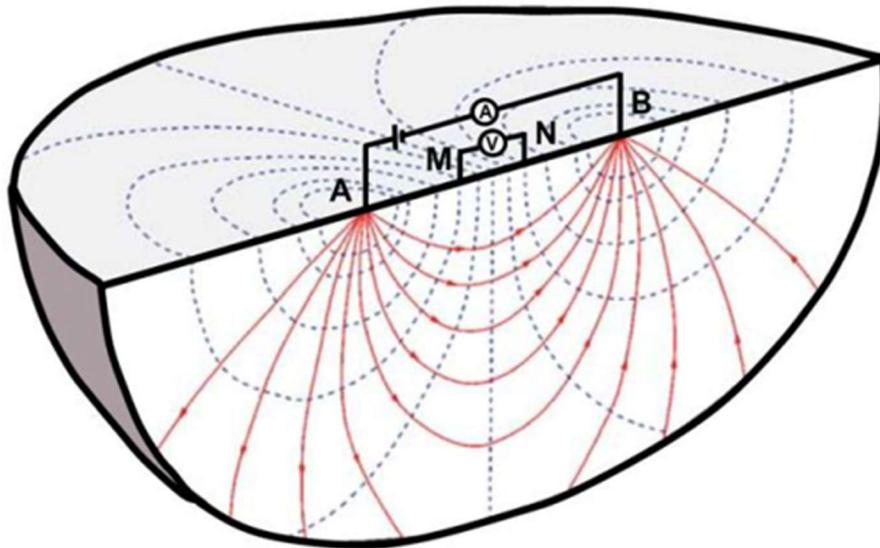


Figura 23: Arranjo de eletrodos: A e B induzem a corrente elétrica; M e N medem a diferença de potencial. Retirado de Braga, 2016.

Segundo Bertuluci (2020) ao se induzir a corrente elétrica no terreno, a partir de uma fonte posicionada em sua superfície, ela fluirá apenas no semi-espço inferior. Considerando o subsolo como um meio isotrópico e homogêneo, o potencial elétrico vai diminuir radialmente, enquanto as linhas de fluxo de corrente ocorrem em direções perpendiculares, do maior para o menor potencial elétrico (figura 24).

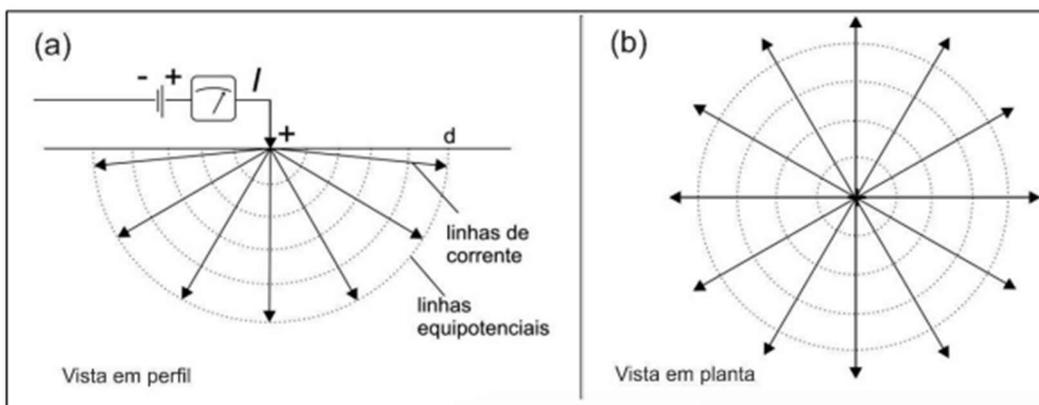


Figura 24: Fluxo de corrente elétrica em um meio homogêneo (Dentith e Mudge, 2014)

A densidade da corrente elétrica (J) pode ser calculada para todas as direções, através da fórmula:

Equação 1

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Sendo I a intensidade da corrente elétrica aplicada, $2\pi r^2$ a área da semiesfera de raio r. Esse valor pode ser descrito através da seguinte fórmula:

Equação 2

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Assim, para a definição da resistividade é necessário o cálculo da diferença de potencial (ΔV) entre os eletrodos M e N. Essa medida é obtida a partir da fórmula de Ohm (Telford *et al*, 1990) calculando-se o potencial resultante no campo elétrico, nos eletrodos M e N (V_m e V_n), prevendo um meio homogêneo e isotrópico.

Equação 3

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) e$$

Equação 4

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

sendo I a intensidade da corrente introduzida no solo, ρ a resistividade que o meio oferece a propagação da corrente e AM, BM, AN e BN a distância entre os eletrodos. A diferença de potencial é dada por:

Equação 5

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N$$

Juntando as equações 3 e 4, temos:

Equação 6

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

Considerando que uma barragem é constituída por diferentes materiais e granulometrias, não pode ser considerada como meio homogêneo. Assim,

possivelmente haverá variações no ΔV , devido às variações de ρ . Por esse motivo, essa medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em subsuperfície. Uma vez feitos os cálculos, é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a), também medida em ohm, através da equação abaixo:

Equação 7

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

O K corresponde ao arranjo dos eletrodos usado no levantamento (Koefoed, 1979), ou seja, o fator geométrico, e é dado por:

Equação 8

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

O coeficiente K permite determinar a resistividade de um cubo unitário de material, eliminando os efeitos geométricos das medições elétricas. (Dentith & Mudge, 2014)

De acordo com Braga, 2016, esta técnica possibilita caracterizar o estado do material em termos de alteração, fraturamento, saturação etc., além possibilitar a identificação litológica dos materiais sem precisar de escavação. A resistividade do material nada mais é que uma medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra durante na sua passagem em um determinado meio.

Uma mesma litologia pode apresentar diferentes valores de resistividade, pois estes sofrem grande influência das condições locais, como quantidade de água, porosidade, tamanho dos grãos, metamorfismo, efeitos tectônicos etc. A água que satura esses materiais, embora apresente valores baixos de resistividade, apresenta uma variação nesses baixos valores. Isso se deve à concentração dos sais minerais nela dissolvidos, sendo o cloreto de sódio o mais comum. Temos que a resistividade da água é inversamente proporcional a concentração desses sais (Braga, 2016).

Além disso, conforme apontado por Oliveira (2021) a presença de argilas pode afetar os valores de resistividade, já que em sua maioria apresentam elevada

área superficial, com ligações químicas não saturadas, possibilitando absorção e troca de íons, acarretando assim baixos valores de resistividade.

A figura 25 apresenta diferentes intervalos teóricos de resistividade para diversos tipos de materiais.

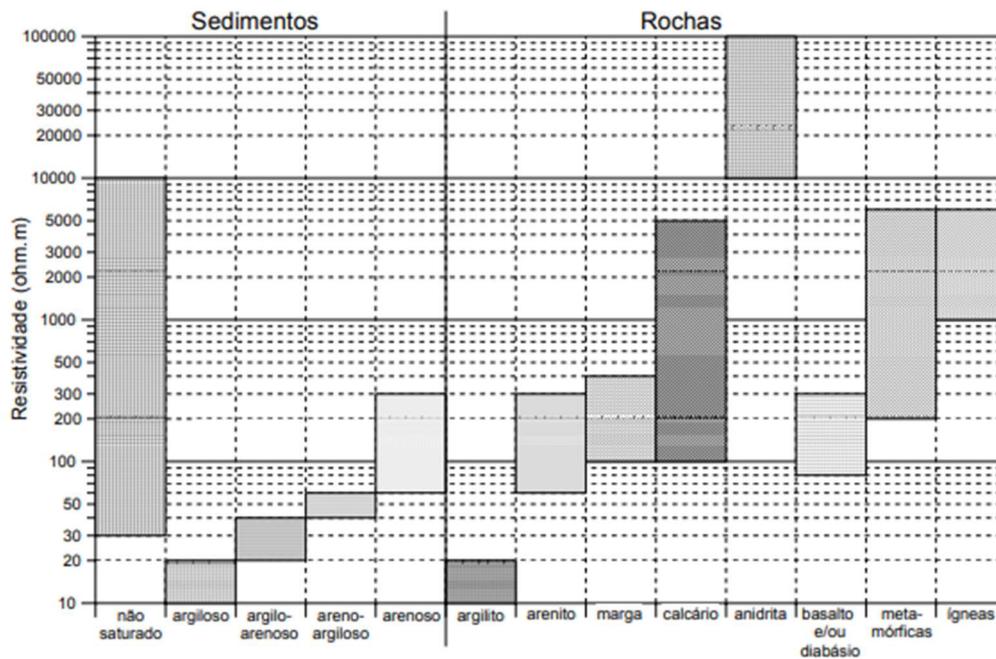


Figura 25: Faixa de variação nos valores de resistividade, retirado de Braga, 2006.

Considerando essa grande variedade de fatores que interferem no valor da resistividade, a interpretação desses dados deve ser feita por pessoa experiente e conhecedora da geologia da área estudada, não sendo aconselhável fazer a identificação de forma puramente automática.

4.1.1 Técnicas de Campo

De acordo com Lago (2006) existem várias técnicas de aplicação do método da eletroresistividade, como a sondagem elétrica e encaminhamento elétrico. A diferença entre elas está no procedimento de campo e na disposição dos eletrodos no terreno. A definição sobre qual técnica deverá ser escolhida está relacionada ao objetivo da pesquisa.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas variações de arranjos de eletrodos. Cada arranjo nada mais é que a geometria de aquisição dos dados. Dentre

as mais utilizadas podemos citar três: caminhamento elétrico, perfilagem elétrica e sondagem elétrica.

A perfilagem elétrica é utilizada no interior de furos de sondagem mecânica. Esse método permite investigações tanto laterais quanto em profundidade (figura 26) e seu objetivo principal é estudar as variações de parâmetros físicos *in situ*. É muito utilizada em hidrogeologia e prospecção de petróleo.

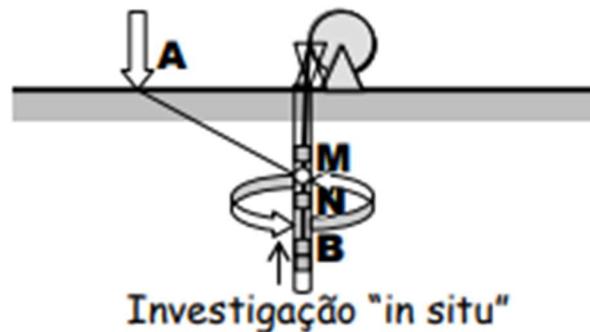


Figura 26: Perfilagem elétrica efetuada no interior de furos de sondagem (retirado de Braga, 2006).

As sondagens elétricas são utilizadas em situações em que o objetivo é investigar o meio em diferentes profundidades, diferentes tipos e situações geológicas, permitindo determinar as respectivas espessuras e resistividade e/ou cargabilidades, a partir de um ponto fixo na superfície do terreno (figura 27). Para que os resultados sejam satisfatórios recomenda-se que essa investigação seja realizada quando o subsolo for composto por camadas lateralmente homogêneas, em relação ao parâmetro físico estudado, e limitadas por planos paralelos à superfície (meio estratificado). Podem ser simétricas (sondagens elétricas verticais – SEV) ou dipolares (sondagens elétricas dipolares-SED) e sua aplicação envolve estudos rasos para Geologia de Engenharia, Ambiental, Hidrogeologia etc.

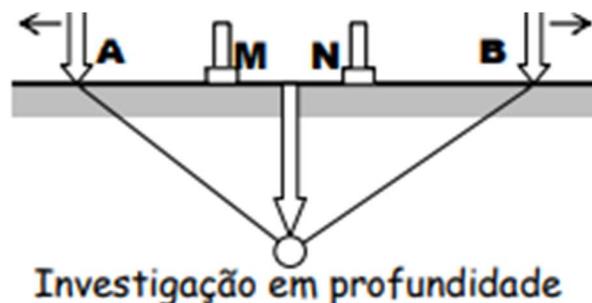


Figura 27: Investigação das variações de parâmetros geoeletricos, com a profundidade a partir de um ponto fixo do terreno (retirado de Braga, 2006).

A técnica da SEV possibilita diversos arranjos de campo e dentre estes podemos citar os arranjos *Schlumberger* e *Wenner*, considerados os principais. A diferença entre eles é pequena e se referem: a praticidade no campo, já que no primeiro é necessário o deslocamento de dois eletrodos enquanto no segundo, é necessário deslocar quatro; as interferências produzidas por ruídos, sendo menor no primeiro que no segundo; a susceptibilidade a erros interpretativos em terrenos heterogêneos, também menor no primeiro que no segundo.

Segundo Braga, 2006, o arranjo *Schlumberger* pode ser considerado superior e é adotado na maioria dos estudos desenvolvidos no Brasil e Europa. Já o arranjo *Wenner* é mais utilizado no Canadá, Estados Unidos e Inglaterra.

O caminhamento elétrico é aplicado principalmente nas situações em que o objetivo do estudo é determinar as discontinuidades laterais dos materiais geológicos em subsuperfície (diques, contatos geológicos, fraturamentos, falhamentos etc.) em um ou mais profundidades fixas (figura 28). Além disto possibilita a determinação da posição do lençol freático e a direção do fluxo d'água (porém com menor precisão que as sondagens elétricas verticais) e mapeamento das plumas de contaminação, em estudos ambientais.

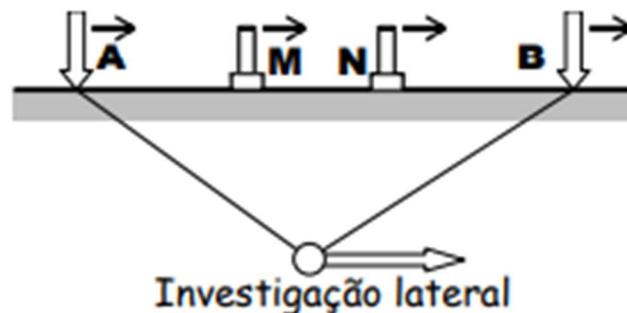


Figura 28: Investigação laterais das variações de parâmetros geoeletricos, com a profundidade (retirado de Braga, 2006).

Os dados de campo obtidos em um caminhamento elétrico geralmente são apresentados sob forma de pseudo-seções de resistividade elétrica aparente. Esse é um bom modo de visualização de dados e permite interpretações qualitativas. O termo pseudo se refere à condição de que a seção não corresponde à realidade. Isso acontece porque a grandeza representada é um valor aparente e porque as profundidades nas quais as medidas são plotadas não correspondem a uma efetiva

profundidade de investigação, ou seja, a escala vertical não tem significado preciso neste modo gráfico de representação (Gandolfo, 2007).

Assim como na SEV, a técnica do caminhamento elétrico também permite diversos tipos de arranjos, tais como: dipolo-dipolo, polo-dipolo, gradiente, Schlumberger, Wenner etc. O método utilizado na investigação da barragem considerada nesta dissertação se refere ao método dipolo-dipolo e será mais detalhado a seguir.

O arranjo Wenner utiliza quatro eletrodos, dispostos em linha, igualmente espaçados e dependendo da sua disposição, pode ser denominado como alfa, beta e gama (figura 29). Oferece bons resultados no mapeamento de estruturas horizontais, já que é sensível a variações verticais de resistividade em subsuperfície, o que leva a uma boa resolução vertical. Contudo, como apresenta baixa sensibilidade para variações horizontais de resistividade, não apresenta bom desempenho na definição de estruturas estreitas e verticais. As principais vantagens e desvantagens desse arranjo são, respectivamente, a elevada razão sinal/ruído e a rápida perda de cobertura com a profundidade.

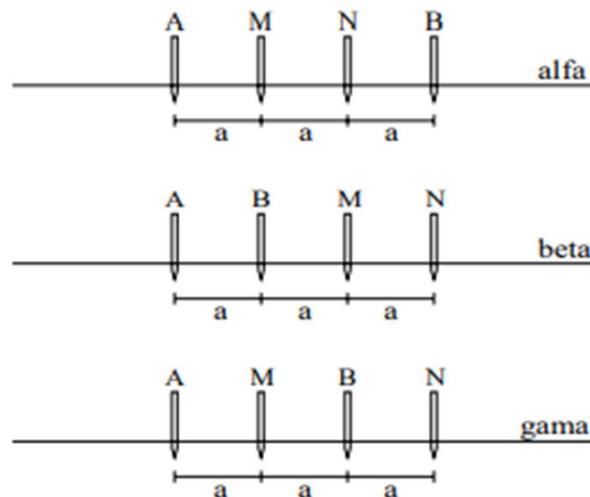


Figura 29: Arranjos Wenner alfa, beta e gama. Retirado de Gandolfo (2007).

O arranjo polo-dipolo consiste em três eletrodos móveis ao longo do perfil de caminhamento (o que garante uma vantagem), sendo um de corrente (A) e dois de potencial (MN), cujo espaçamento permanece constante. Neste método, o eletrodo de corrente que fecha o circuito é mantido fixo e precisa estar a uma distância grande, denominada como infinito (corresponde a pelo menos 10 vezes a maior

abertura entre os eletrodos externos do arranjo que permanecem na linha do levantamento), para que se possa garantir que este tenha mínima influência sobre o resto do arranjo (figura 30), o que também contribui para a elevação da razão sinal/ruído.

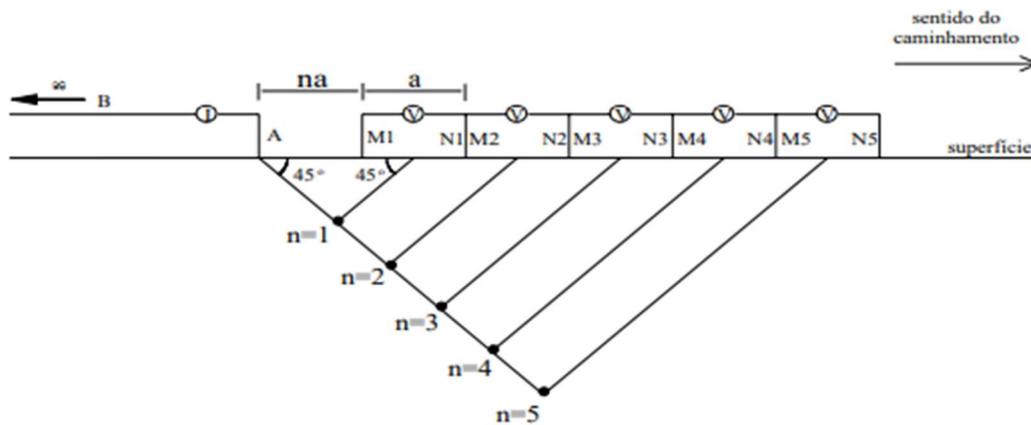


Figura 30: Arranjos polo-dipolo. Retirado de Gandolfo, 2007.

A principal desvantagem desse arranjo está na sua assimetria, o que pode dificultar o posicionamento de uma anomalia com base em uma interpretação meramente qualitativa. Além de, eventualmente em determinados locais, pode não haver espaço para instalação do eletrodo infinito.

O arranjo Schlumberger corresponde a um arranjo simétrico em relação a um ponto central, com os eletrodos de corrente A e B, posicionados externamente aos eletrodos de potencial M e N (figura 31). A Abertura MN deve ser menor ou igual a um quinto da abertura AB. O que possibilita uma boa medição do gradiente do potencial. Apresenta boa resolução para camadas verticais.

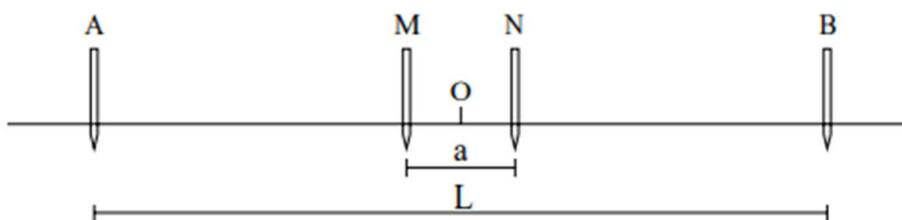


Figura 31: Arranjos Schlumberger. Retirado de Gandolfo, 2007.

O procedimento consiste em determinar o espaçamento dos dipolos e a sua respectiva quantidade de acordo com a profundidade a ser investigada. Esse espaçamento deve ser constante e disposto na superfície ao longo de perfis previamente estaqueados. Quanto maior for essa distância, maior profundidade pode ser alcançada, tendo como limite de valor aceitável, as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presente no local. Uma vez feitas as leituras, o arranjo é deslocado para a estaca seguinte, onde novas leituras serão obtidas até que todo o perfil seja levantado.

De acordo com Gandolfo (2007) à medida que o dipolo de potencial se afasta da corrente, menores serão os valores das leituras obtidas, chegando a um limite em que o ruído estará na mesma ordem de grandeza do sinal. Normalmente limita-se a investigação em 5 ou 6 níveis em profundidade quando são utilizadas grandes aberturas de dipolos (maiores que 20 m), devido à baixa relação sinal ruído.

Essa limitação pode ser eliminada se forem utilizados equipamentos de grande potência e/ou sensibilidade ou ainda em ambientes muito resistivos, onde as leituras de ΔV são mais elevadas, se comparadas a um local condutivo sob a mesma geometria de arranjo.

Em estudos hidrogeológicos rasos e ambientais, onde a utilização dos dipolos é feita com extensão reduzida (menores que 10 m), as investigações poderão ser superiores a 5 ou 6 níveis de profundidade.

Para a plotagem dos parâmetros geoeletricos obtidos, é feita uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN, até atingir-se o ponto médio entre os centros destes dipolos, considerando como ponto de atribuição das leituras (figura 33). Esse processo possibilita, após executado, a obtenção de uma pseudo-seção de resistividade ou cargabilidade aparente.

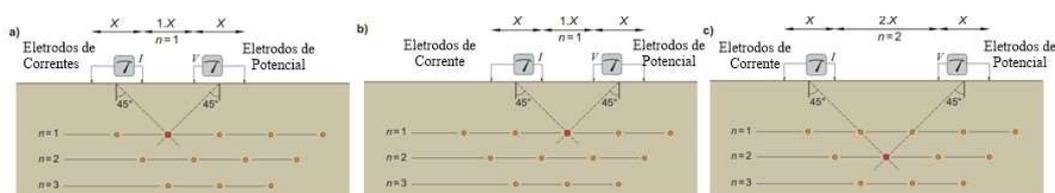


Figura 33: Criação de uma pseudo-seção a partir do arranjo dipolo-dipolo. Adaptado de Dentith & Mudge, 2014.

A resistividade aparente pode ser determinada a partir da equação 7, onde o coeficiente K, nesse caso, é dado por:

Equação 10

$$K = 2\pi \cdot Gx$$

Sendo G expresso por:

Equação 11

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$

Assim, K corresponde ao fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, x é o espaçamento entre os dipolos AB e MN adotado e n é o nível de investigação correspondente.

Os dados podem ser interpretados tanto em perfis quanto em mapas. Inicialmente os perfis são interpretados individualmente para depois serem interpretados em conjunto.

4.1.1.2 Pseudo-seção

A pseudo-seção é assim chamada porque os dados obtidos de diferentes níveis de investigação não correspondem aos valores reais dos parâmetros de cada camada investigada, não podendo por isso ser classificada como uma seção verdadeira.

É normal em uma pseudo-seção aparecerem anomalias resultantes de corpos ou estruturas geológicas em dois flancos anômalos (aspecto de calça), um em função dos eletrodos de potenciais e o outro em função dos eletrodos de corrente. Esse problema pode ser amenizado a partir de uma filtragem, visando eliminar os flancos resultantes.

Uma das maneiras de realizar essa filtragem é através do sistema de plotagem denominado como média dos triângulos. Essas médias triangulares podem ser obtidas de duas formas: médias triangulares totais, onde são obtidas as médias de todos os valores incluídos no triângulo, considerando os níveis investigados; e, médias triangulares laterais, onde são consideradas as médias dos valores externos

do triângulo. Em ambas as situações, os valores médios são plotados no centro do triângulo, na vertical (figura 34).

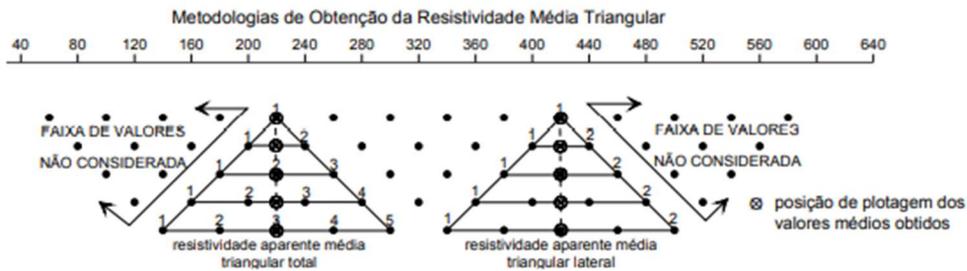


Figura 34: Sistema de plotagem pela média do triângulo, retirado de Braga, 2006.

Outra forma de se obter a resistividade real é aplicando um processo denominado inversão. Em tese, esse procedimento conduz a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas. O tratamento dos dados utilizado neste trabalho foi realizado através do software RES2DINV, pelo método da inversão.

4.1.1.3 Inversão

Segundo Madrucci *et al* (2005), o método da inversão consiste na determinação de um modelo bi-dimensional (2D) de resistividade a partir do conhecimento da geologia local e dos dados obtidos nos levantamentos elétricos de campo. O software RES2DINV divide a subsuperfície em um número de blocos retangulares, sendo o arranjo desses blocos definido pela distribuição dos dados na pseudo-seção (figura 35). A resistividade dos blocos retangulares que compõe a pseudo-seção é determinada pelo software.



Figura 35: Exemplo de arranjo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo dipolo-dipolo. Retirado de Gandolfo, 2007.

O programa disponibiliza opções de métodos de inversão para modelagem das seções e a utilizada corresponde ao método robusto (*Robust Inversion*). A

escolha por este método advém da tentativa de minimizar as mudanças absolutas nos valores de resistividade, tendendo a produzir modelos com interfaces nítidas entre regiões com diferentes valores de resistividade.

Em geral o modelo de blocos gerado pelo RES2DINV utiliza a mesma largura do espaçamento dos eletrodos para cada bloco, o que funciona bem na maioria dos casos. O refinamento aplicado neste trabalho diz respeito ao modelo de blocos (*Use Model Refinement*), que reduz a largura dos blocos gerados. Nas situações em que há grandes variações de resistividade em superfície, melhores resultados são obtidos utilizando blocos mais estreitos.

Por fim, a interpretação das anomalias foi feita de forma qualitativa ou semi-qualitativa, configurando um modelo geoeletrico integrado às feições geológicas.

4.2 Microssísmica

A microssísmica é uma técnica sísmica baseada na medição de eventos de baixa magnitude registrados pelas estações. Como esta técnica em muito se assemelha ao estudo de terremotos, fornecendo informações sobre a sua localização e extensão, são abordados abaixo alguns tópicos relacionados a este tema.

4.2.1 Sismologia e Sismicidade

A sismologia é a ciência que estuda os terremotos ou sismos e tudo a eles associados. Esses fenômenos ocorrem na natureza devido ao acúmulo de tensões, sejam elas compressivas ou distensivas, levando a rocha até o limite da sua resistência ocasionando uma ruptura. Essa ruptura gera um movimento repentino entre os blocos, e dessa energia liberada, surgem vibrações que se propagam no meio. O plano de ruptura formado é denominado como falha geológica, o ponto onde se inicia a ruptura e a liberação de energia como hipocentro e a sua projeção da superfície como epicentro (figura 36). A distância entre os dois é a distância focal (Assumpção & Neto, 2000).

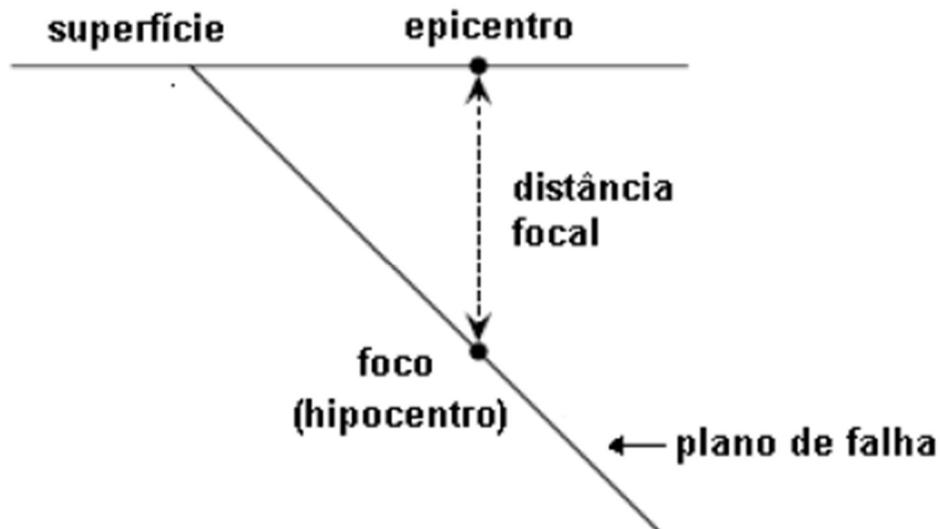


Figura 36: Seção vertical, perpendicular ao plano de falha, definindo epicentro, foco e distância focal de um terremoto.

É por meio da sismologia que se torna possível estudar o interior da terra, já que métodos diretos de investigação (como perfurações, por exemplo) se limitam às camadas superficiais do planeta. O conhecimento a respeito de uma crosta rasa, manto profundo (incluindo o processo de convecção) e núcleo líquido e sólido só foi possível de ser formulado a partir das variações de velocidade das ondas sísmicas com a profundidade.

Quando estruturas geológicas sofrem reativação das falhas tectônicas, é gerada uma assinatura sísmica (*seismic waveforms*) devida à liberação de energia. Essa assinatura nada mais é do que uma gama de registros das assinaturas de onda. É através desses eventos sísmicos que se torna possível conhecer as propriedades físicas do meio, a partir da análise dos diferentes tipos de ondas elásticas.

4.2.2 Ondas Sísmicas

Ondas sísmicas ou *ground motions*, são vibrações que se propagam em todas as direções a partir de um hipocentro. Essas ondas podem percorrer grandes distâncias transportando energia da sua fonte geradora através do meio sem, porém, resultar em um deslocamento efetivo desse meio. Ou seja, não há transporte de matéria.

Essas ondas são registradas de forma gráfica, através de um sismógrafo, em sismogramas. Nele estão inseridas informações relativas ao tempo por deslocamento, velocidade ou aceleração do terreno.

Existem diversos tipos de onda, dentre as quais podemos dividir entre ondas de corpo (*body waves*) e de superfície (*surface waves*). De acordo com Paula (2020), as ondas de superfície são dispersivas, ao contrário das ondas de corpo, com isso, os diferentes componentes de comprimento de onda se propagam em diferentes velocidades, apresentando assim maior energia e conseqüentemente maior poder destrutivo. A figura 37 compara os diferentes tipos de onda em um sismograma.

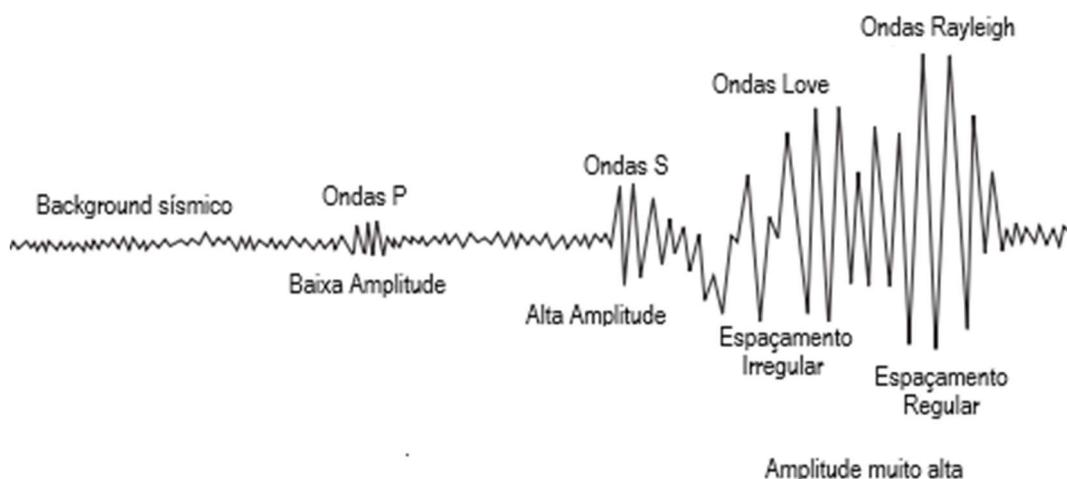


Figura 37: Chegada das ondas sísmicas em um sismograma. Modificado de Kusky (2008).

As ondas de corpo podem ser classificadas como ondas P e S e viajam através do interior do material. Apresentam velocidade maior que as ondas de superfície e a sua velocidade de propagação está diretamente ligada à resistência do material. Quanto maior a resistência ao seu movimento maior a velocidade.

As ondas P estão associadas a esforços de compressão e tração do meio (Paula, 2020) e se propagam tanto em meios sólidos quanto líquidos. Devido à sua direção de propagação são ditas ondas longitudinais e, por serem as primeiras a serem registradas quando ocorre um sismo, primárias. Considerando o sistema de eixo cartesiano, o eixo x corresponde à direção de propagação da onda. Neste sentido, as partículas do meio descrevem um movimento de vai e vem sendo repetidamente comprimidas e estendidas.

A velocidade da onda P (V_P) é dada pela seguinte fórmula:

Equação 12

$$V_P = \sqrt{y \frac{(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu)}} = \sqrt{2\mu \frac{(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)}}$$

sendo y o módulo de Young, ρ a densidade, ν coeficiente de Poisson e μ o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento.

As ondas S são denominadas como secundárias (por serem registradas depois das ondas primárias) ou de cisalhamento (*shear*) e não se propagam em meios fluidos. A propagação desse tipo de onda obriga as partículas a se movimentarem para cima e para baixo fazendo com que os elementos adjacentes sofram variação de forma.

A velocidade das ondas S (V_S) é expressa por:

Equação 13

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

As ondas de superfície são o produto da interação envolvendo as ondas de corpo, causadas por reflexões e refrações na superfície do terreno e nas interfaces entre as camadas de diferentes densidades. Os efeitos produzidos por essas ondas não ultrapassam, em geral, profundidades maiores que 30 km. Estas viajam ao longo da superfície de um material, movendo-se em um movimento elíptico ondulante, que se extingue à medida que a profundidade aumenta (Grotzinger & Jordan, 2013). Desta forma, quanto mais superficial for um terremoto, maior será a amplitude das ondas de superfície.

Dentre as ondas de superfície podemos destacar as ondas Love e a ondas Rayleigh. De acordo com Chammas *et al* (2003) as ondas Rayleigh apresentam velocidade próxima das ondas S e, portanto, próxima do módulo de cisalhamento dinâmico. A sua direção de propagação oscila em dois componentes: vertical (movimento para cima e para baixo) e horizontal (para frente e para trás). Com isso,

a partícula é elíptica e retrograda, com deslocamento vertical cerca de 1,5 vezes maior que o horizontal (Mendecki, 2013).

Em geral, ondas Love têm velocidade de propagação maior que as ondas Rayleigh e são semelhantes às ondas S, porém sem deslocamento vertical. Esta movimenta o solo de um lado para outro, perpendicular à direção de propagação, produzindo tremores horizontais (Mendecki, 2013).

A figura 38 mostra como ocorre a deformação do meio sólido conforme a propagação das ondas sísmicas supramencionadas. É possível notar que esta deformação é elástica, ou seja, após a passagem das ondas, o material retorna à sua forma inicial.

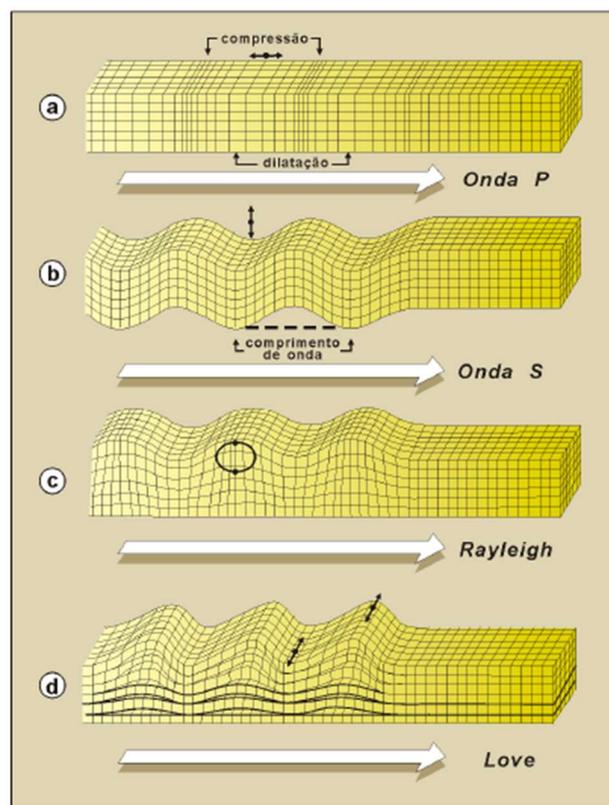


Figura 38: Principais modos de propagação sísmica, sendo (a) ondas P, longitudinal; (b) ondas S, transversal; (c) ondas Rayleigh, combinação das ondas P e S, a partícula assume um movimento elíptico; e (d) ondas Love, oscilação horizontal transversal. Retirado de (Assumpção & Neto, 2000).

4.2.3 Localizando Terremotos

A localização do epicentro é obtida através dos sismogramas considerando a quantidade de tempo entre a chegada das ondas P e das ondas S. Com auxílio das curvas de tempo de viagem, determina-se a distância do sismógrafo até o epicentro.

Caso seja possível estimar a distância a partir de três ou mais estações, localiza-se o epicentro (Grotzinger & Jordan, 2013).

De acordo com Havskov (2012) o método do círculo possibilita, de maneira simples, a localização do evento. Conforme ilustrado na figura 39, é feito um desenho de um círculo em três ou mais estações, tendo como seu centro cada estação. O raio de cada círculo corresponde à distância epicentral calculada a partir da diferença de chegada entre as ondas P e S. Como os círculos raramente se cruzam em um único ponto, a localização do epicentro é dada pela área hachurada.

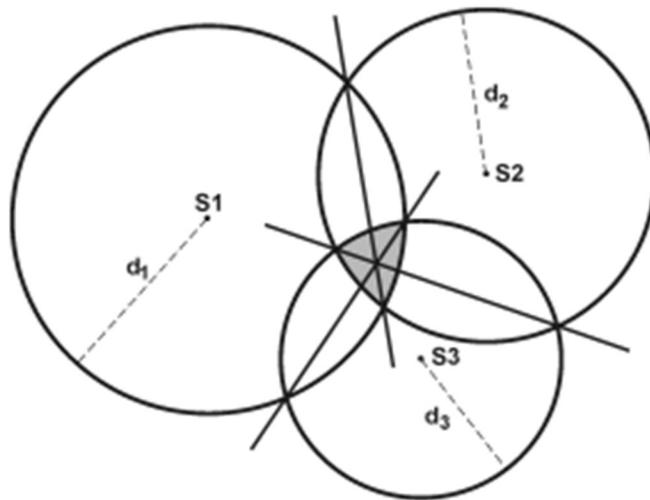


Figura 39: A ilustração apresenta o processo de localização de um evento sísmico pelo método do círculo. As estações correspondem a S1, S2 e S3 e seus respectivos raios, d_1 , d_2 e d_3 . A área hachurada representa o epicentro, onde os círculos se interceptam. Retirado de Havskov, 2012.

Segundo Mendecki (2013) a hora de chegada das ondas P e S está associada ao início do processo de ruptura. Um possível erro de localização pode estar relacionado a erros na determinação do tempo de chegada, modelos de velocidades inadequados, coordenadas das estações imprecisas e a distribuição destruição espacial das estações em relação à localização do evento.

Há ainda outros métodos descritos na literatura que possibilitam a localização do epicentro. A título de exemplo temos o método *Strong Motion Centroid*, que localiza o ponto onde a vibração das ondas é maior e mais forte, ao invés do início da ruptura. Este se baseia no princípio de que a amplitude decai conforme se distancia da fonte. Contudo, como amplitude também sofre interferência de outros fatores, essa localização não é precisa, sendo mais utilizada em situações específicas (Mendecki, 2013, Kanamori, 1993).

4.2.4 Medindo Terremotos

Uma forma de classificar os efeitos que as ondas sísmicas provocam em algum ponto é por meio da intensidade sísmica. Essa medida não é obtida através de equipamentos, mas sim, constitui um meio de quantificar o seu poder de destruição, sendo a magnitude a principal responsável pela intensidade da onda sísmica. Naturalmente, a distância entre o ponto de interesse e o epicentro terá grande influência nesta classificação, já que com o aumento da distância, a intensidade tende a diminuir (Paula, 2020; Grotzinger & Jordan, 2013).

Em 1902 Giuseppe Mercalli criou uma escala de intensidade sísmica baseada apenas nos efeitos e danos produzidos por terremotos e percebidos pelas pessoas. Nessa escala um mesmo sismo pode apresentar diferentes classificações, já que a intensidade pode ser diferente em cada localidade reportada. Essa condição é uma das desvantagens dessa escala, já que não sofre correção conforme se distancia do epicentro.

Por ter esse efeito meramente qualitativo, a escala Mercalli não pode ser avaliada em termos de valores absolutos. Os níveis dos abalos foram classificados de I a XII, sendo o nível I referente a tremores leves, onde a maioria das pessoas não nota; até o nível XII, onde há alteração do relevo e completa destruição. Com o passar dos anos essa classificação foi sendo modificada e sendo substituída pela Escala Mercalli modificada.

Enquanto a escala Mercalli é apenas baseada na percepção humana, a escala Richter é quantitativa. Esta foi desenvolvida por Charles Richter, em 1935 que procurava uma forma de quantificar a intensidade de um terremoto através de uma escala. Denominada como escala de magnitude, é logarítmica por definição, o quer dizer que um terremoto de intensidade 5 é 10 vezes maior que de um de intensidade 4 e 100 vezes maior que um de intensidade 3. Para elaborá-la Richter utilizou o logaritmo da maior amplitude de onda registrada pelo sismógrafo durante um tremor de terra (Grotzinger & Jordan, 2013).

Considerando a maneira como foi definida essa escala de magnitude, não há um limite superior ou inferior e apenas compara terremotos entre si. Como apenas

dá uma ideia da quantidade de energia liberada durante um terremoto, hoje em dia os sismólogos preferem a medida relativa ao momento sísmico já que faz referência as dimensões da área fonte.

A tabela 2 apresenta uma comparação entre as escalas Richter e Mercalli Modificada, retirada de Kusky (2008).

Tabela 2: Comparação entre as escalas Richter e Mercalli Modificada, retirada de Kusky (2008).

Escala Mercalli Modificada	Magnitude Richter	Descrição
I-II	< 2	Não é percebido pela maioria das pessoas.
III	3	É percebido por algumas pessoas dentro de casa, especialmente em altos edifícios.
IV-V	4	É notado pela maioria das pessoas. Objetos balaçam e chacalham.
VI-VII	5	Todas as pessoas sentem. Algumas construções sofrem danos e ocorrem ondas em lagoas
VII-VIII	6	Existe dificuldade em permanecer parado, as pessoas entram em pânico, há dificuldade em dirigir e ocorrem danos moderados em edifícios
IX-X	7	Grandes danos são gerados, há pânico geral na população, canos subterrâneos são quebrados e ocorrem grandes deslizamentos de terra.
XI-XII	8 ou mais	Destruição quase total.

O momento sísmico é uma medida utilizada para dimensionar o tamanho absolutos dos terremotos e está relacionada com as propriedades físicas do

falhamento que dá origem aos terremotos. O valor referente a esta medida é proporcional ao produto da área de falhamento e do deslocamento médio da falha. A magnitude de momento análoga, aumenta em uma unidade aproximadamente para cada aumento de 10 vezes para a área do falhamento (Grotzinger & Jordan, 2013).

4.2.5 Propriedades de um Sismograma

Os sismogramas fornecem atributos e propriedades básicas referentes à fonte sísmica. Nele estão contidas propriedades de registros que são relevantes ao estudo das ondas sísmicas. Um sismograma tem como finalidade auxiliar na interpretação geológica ou geofísica dos dados. Desta forma, para fins de entendimentos futuros, se faz necessário o esclarecimento de termos que serão abordados adiante.

O centróide da fonte sísmica, indicado por um ponto no espaço a partir de coordenadas (x , y e z) em um sismograma é definido como localização da fonte. A magnitude do evento é determinada a partir da quantidade de energia liberada durante um sismo (baseado na amplitude das ondas sísmicas). Já a magnitude de momento é estimada a partir do momento sísmico (Paula, 2020).

De acordo com Paula (2020) há ainda termos relacionados à energia liberada, raio da fonte e queda de tensão. Estes, respetivamente, dizem respeito à liberação de tensão durante a ruptura; ao raio equivalente, considerando-se como uma fonte esférica; e quantidade de tensão liberada pela fonte sísmica (usualmente dada em MPa).

Segundo Mendecki (2013) a amplitude de onda é caracterizada pela perturbação máxima de cada ciclo. Esta é igual ao deslocamento máximo, velocidade ou aceleração do movimento do solo, a partir do ponto de equilíbrio. O número de ciclos que passa por um ponto fixo é denominado como frequência, sendo expresso em *hertz* (Hz). A quantidade de tempo necessária, medida em segundos, para que um ciclo completo seja produzido, ou passar por um determinado ponto, é classificado como período. O comprimento de um ciclo completo, medido de crista a crista é intitulado como comprimento de onda e este é afetado pela fonte e pelo meio em que a onda se propaga.

A análise de um sismograma permite obter, através das amplitudes máximas, os valores de pico referentes ao deslocamento do terreno (*peak ground displacement*, PGD), velocidade do terreno (*peak ground velocity*, PGV) e aceleração do terreno (*peak ground acceleration*, PGA (Paula, 2020 e Oliveira, 2021)).

Para entender o conceito de velocidade utilizado nessa interpretação devemos considerar que a velocidade em relação a um terremoto diz respeito à rapidez com que o meio está sendo agitado em um determinado ponto. Desta forma, a velocidade máxima é a maior velocidade de tremor registrada em uma localização específica. O mesmo se aplica ao conceito de aceleração. Considerando que a velocidade em que o meio vibra ou oscila, ora aumentando, ora diminuindo, o local onde ocorre o maior aumento de velocidade registrado em uma determinada estação durante um sismo é tido como PGA.

O termo PGD, de acordo com Douglas (2002) é composto por dois parâmetros: o deslocamento transitório e o deslocamento permanente. O primeiro deve ser igual a zero ao final do registro, configurando deformação elástica. Já o segundo está associado a uma falha ou deslizamento, ou seja, o deslocamento sofrido não pode ser regenerado, deformando o meio de forma permanente.

Os danos causados pelos terremotos às construções estão diretamente ligados ao movimento do solo durante um sismo. Como esses movimentos podem ser quantificados através do PGA e do PGV, esses valores são considerados nos projetos. A orientação sobre qual valor de pico deve ser utilizado como referência varia de acordo com a finalidade do projeto. Assim, segundo Mendecki, (2013) o PGA é mais conveniente aos engenheiros estruturais já que a força máxima experimentada por uma estrutura rígida de massa m é $F_{max} = m.PGA$. No entanto este não é um parâmetro adequado para avaliar o potencial de dano. Um grande PGA associado a um pulso de alta frequência pode ser absorvido pela inércia da estrutura, com pouca deformação. Por outro lado, uma aceleração mais moderada associada a um estímulo de longa duração e baixa frequência pode resultar em uma deformação significativa das estruturas.

4.2.6 Monitoramento Microssísmico

Um evento microssísmico é definido como um terremoto que não pode ser percebido pelo homem, apenas por sensores (geofones ou acelerômetros). O seu monitoramento é basicamente a medição desses microterremotos.

Segundo Grechka & Heigl (2017) o monitoramento microssísmico se tornou popular através da indústria de petróleo e gás que utilizavam a técnica para avaliar o encerramento de poços de hidrocarbonetos não convencionais. O processo conhecido como estimulação hidráulica utilizado por essa indústria consiste em um fraturamento associado a emissão acústica, que faz com que as ondas sísmicas percorram as rochas de forma muito semelhante ao que acontece em um terremoto, mas em uma escala menor. Essa correlação possibilitou inferir a localização desses hipocentros gerados de forma antrópica.

Ainda que a microssísmica se baseie na sismologia dos terremotos para elucidar a interpretação e processamento dos dados obtidos, existem algumas considerações entre a sismologia global e o monitoramento microssísmico. A exemplo disso temos o fato de existir ampla rede de sismógrafos enquanto esses estudos geofísicos dispõem de esparsos geofones. Embora a estrutura da Terra seja plenamente conhecida sendo refinada a cada terremoto, para cada levantamento microssísmico há de se constituir um novo modelo de velocidades (Grechka & Heigl, 2017).

De acordo com Oliveira (2021) preocupações relativas ao arranjo dos sensores minimizam o erro de cálculo referente a localização da fonte sísmica da área monitorada. Assim, também, a magnitude mínima perceptível do sistema sofre interferência, sendo necessário o teste de sensibilidade dos sensores.

A velocidades das ondas S e P na região precisam ser identificadas para estimar a localização da fonte dos eventos registrados. Daí a importância da determinação dos modelos de velocidade. Estes poderão ser construídos a partir de modelos geológicos e devem ser posteriormente calibrados a fim de aumentar a precisão (Oliveira, 2021).

Uma vez instalado o sistema de monitoramento sísmico em uma barragem, se faz necessário classificar os sinais registrados. Existe uma gama de processos dinâmicos que podem ser detectados pelo sistema. No entanto, em geral os dados registrados se referem a explosões (detonações para desmonte de rocha) e deslizamento ou cisalhamento repentino causado por eventos sísmicos naturais (terremotos). Na teoria, cada evento apresenta uma assinatura específica.

A dificuldade na interpretação dos dados está em diferenciar as explosões de eventos naturais. Conforme Malovichko (2012) é relevante a esta tarefa considerar os seguintes parâmetros:

- Razão das amplitudes das ondas P e S (em várias faixas de frequência);
- Razão das amplitudes das ondas de corpo e de superfície;
- Profundidade da fonte;
- Mecanismo de origem.

Existem ainda outros fatores que poderão auxiliar nesta análise, segundo Malovichko (2012). Geralmente as detonações ocorrem em datas específicas. Isso permite relacionar o evento registrado ao momento da explosão. Além disso, o autor aponta que as explosões são frequentemente caracterizadas pela repetição de sinais semelhantes em um curto intervalo de tempo e as ondas irradiadas apresentam maior frequência em comparação aos eventos naturais.

A principal diferença entre a propagação das ondas sísmicas relativas a explosões e eventos naturais é que na primeira há predominância da radiação das ondas P, que apresenta polaridade positiva em todos os sensores, enquanto na segunda a radiação das ondas S é mais forte que das ondas P (Malovichko, 2012). A figura 40 compara esses padrões.

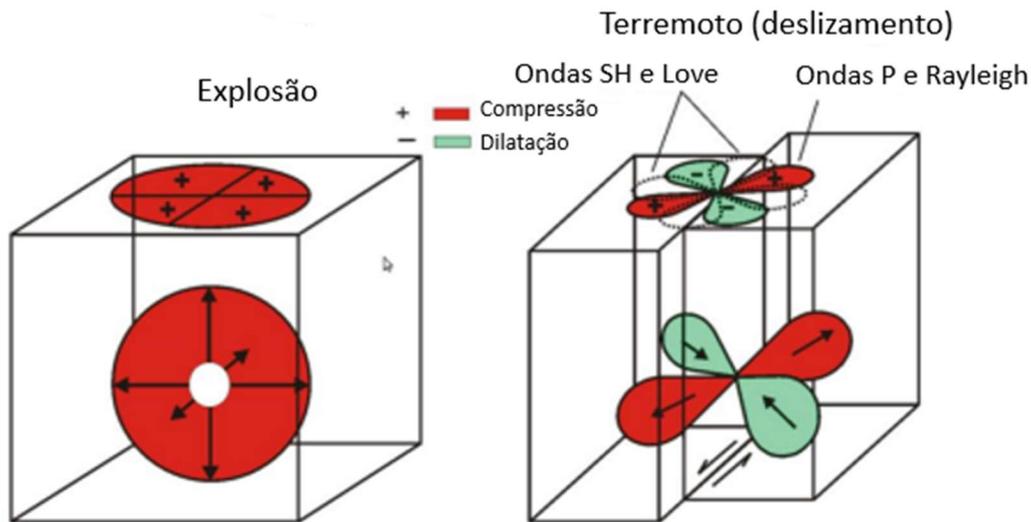


Figura 40: Padrão de radiação de uma explosão e de um evento natural. Adaptado de Malovichko (2012).

O objetivo de um monitoramento microsísmico é, a partir de um evento microsísmico ocorrido, obter as seguintes informações:

- Identificar, no meio investigado, se a rocha ou estrutura estão próximas à ruptura através do acompanhamento dos processos de reativação de estruturas geológicas pré-existentes;
- Uma vez identificada a eminência da ruptura, acompanhar a evolução dos processos que poderão levar a reativações de estruturas e instauração de quebras mecânicas através do monitoramento da energia liberada nestes processos. Para isso é necessário, a partir da triangulação dos geofones, se obter a localização dos epicentros dos fenômenos dinâmicos;
- Qual a dimensão dessa ruptura. O quanto da rocha ou estrutura está comprometida de acordo com a quantidade de energia liberada.

A figura 41 compara as amplitudes de ondas geradas em um evento microsísmico e em um terremoto. Segundo Kamei *et al* (2015) o conteúdo de frequência relativo à microsísmica é maior que o do terremoto, já a frequência é inversamente proporcional ao tamanho do terremoto. Os dados microsísmicos são caracterizados por magnitudes menores e frequência de onda de menor duração. Por outro lado, a maioria dos dados de terremoto são caracterizados por magnitudes maiores, frequência baixa, comprimentos de onda mais longos e duração mais longa.

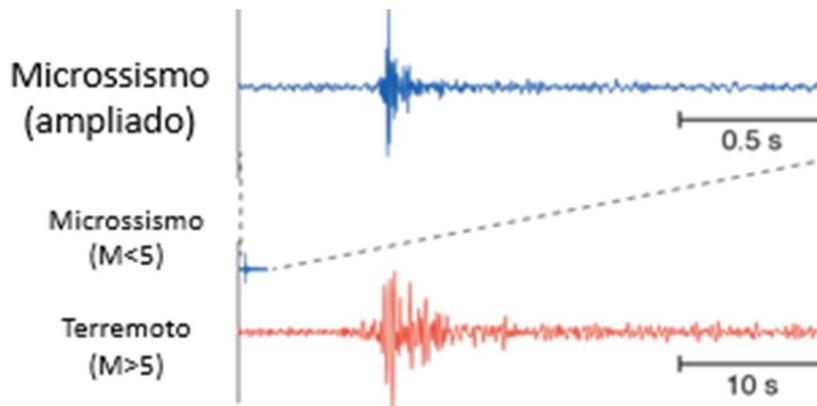


Figura 41: Exemplos de amplitudes de assinaturas sísmicas geradas por um evento microssísmico ($M_w < 0$), em azul, e por um terremoto natural ($M_w > 5$), em vermelho. Fonte: Adaptado de Kamei *et al.* (2015).

Existem várias formas de realizar um monitoramento microssísmico, o que torna imprescindível que este seja elaborado conforme o objetivo. Um sistema de monitoramento projetado para o mapeamento de fraturamento hidráulico não será apropriado para o estudo de estabilidade de encostas, por exemplo. Por esse motivo, para que se obtenha resultados satisfatórios, recomenda-se que sejam avaliadas as condições específicas do meio, satisfazendo os requisitos técnicos (alta taxa de amostragem, rede flexível e à prova de explosão) na elaboração do projeto do monitoramento (Xiao, *et al.*, 2006).

O monitoramento microssísmico ocorre de forma contínua e possui duas abordagens: convencional e passiva. A abordagem passiva se utiliza da técnica de interferometria sísmica passiva, na qual conta com o ruído ambiente para avaliar a velocidade de propagação de onda no meio. O monitoramento é feito a partir de um par de receptores, onde um deles representa uma fonte virtual. O meio monitorado é a extensão entre esses receptores (Rodrigues *et al.*, 2020). A abordagem convencional diz respeito a um monitoramento sismográfico mais sensível, registrando eventos de magnitude relativa a momento sísmico da ordem de -2 a 0. Este se baseia no registro de vibrações provocadas por uma fonte ativa (Oliveira, 2021), cuja fontes sísmicas provêm da tectônica de placas ou por indução humana (Kamei *et al.*, 2015), como desmonte de rocha por exemplo.

De acordo com Dias *et al.* (2016) a microssísmica convencional avalia a atividade microssísmica em uma determinada área quando ocorre o dano no maciço rochoso (falhas ou fraturas), indicando a sua localização (com uma certa precisão)

e o seu respectivo grau de comprometimento (extensão), a partir das características das vibrações. Quando o ambiente não apresenta material fraturado ou microssismos, a técnica adequada diz respeito a microssísmica passiva, uma vez que se utiliza de uma análise de ruído.

4.2.6.1 Modelos de Velocidade

Como foi dito anteriormente é esperado, em um sistema de monitoramento microssísmico, a calibrações das velocidades das ondas sísmicas. Para que isso seja possível, são feitas detonações para este fim para cada sismograma.

A partir da liberação de energia, os eventos microssísmicos produzem ondas mecânicas que se propagam a partir da área fonte. Os sensores captam essas ondas e com isso, é possível validar o nível de resposta que um determinado ambiente geológico irá transmitir em termos de assinatura sísmica, além de permitir conhecer as velocidades das ondas P e S na região de interesse.

Uma vez mapeada a heterogeneidade do maciço através dos modelos de velocidade, as vibrações causadas pelas atividades de mina que se encontram no entorno da barragem e que serão captadas pelos sensores, poderão ser analisadas a partir das respectivas assinaturas sísmicas.

4.2.6.2 Equipamentos

De acordo com Xiao *et al.* (2016) um sistema de monitoramento microssísmico é composto por quatro componentes: os sensores, os instrumentos de aquisição de dados, as unidades de transferência de dados e o servidor central com o software de processamento.

Quando ocorre algum evento microssísmico, seja ele de natureza antrópica ou não, resulta da irradiação das ondas P e S através do meio. À medida que essas ondas são captadas pelos sensores, sismogramas são gerados e enviados para os instrumentos de aquisição de dados para serem amplificados e digitalizados. Daí, sinais elétricos são transmitidos para o servidor central através das unidades de transferência. Ao fim desse processo, os sismogramas poderão enfim serem visualizados em um software de exibição (Xiao *et al.*, 2016).

Uma vez instalados, os sensores captam as ondas elásticas geradas a partir de algum evento e as converte em um sinal analógico. Estes equipamentos são divididos em duas categorias: geofones e acelerômetros. Ambas as categorias se subdividem em dois modelos para o registro de onda: uniaxial e triaxial (Xiao *et al.*, 2016).

Segundo Oliveira (2021) o geofone trata-se de uma massa magnética suspensa por uma mola, envolta por uma bobina que basicamente mede a velocidade da partícula (figura 42). Em equipamentos mais modernos um ímã é fixado na carcaça do sensor e a bobina representa a massa suspensa pela mola. Seu sistema funciona com o princípio da indução eletromagnética, onde a bobina se movimenta em relação ao ímã, induzida pelas vibrações do terreno. O sinal elétrico gerado é relativo à velocidade obtida.

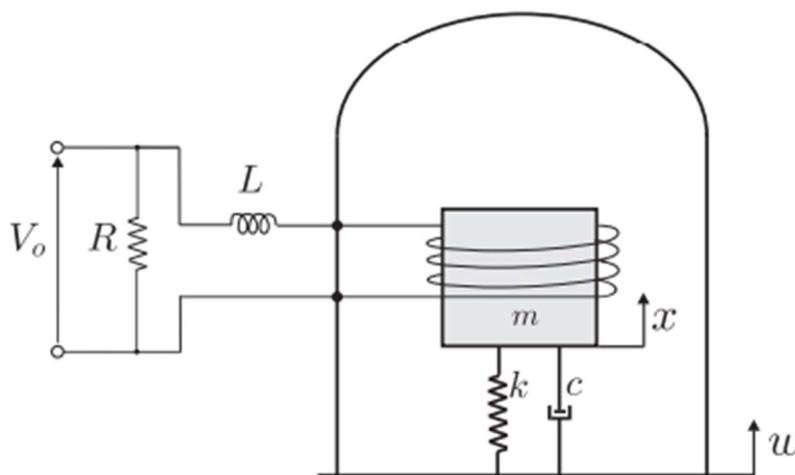


Figura 42: Princípio de funcionamento de um geofones, sendo V_o a voltagem; R a resistência; L a indutância; m a massa suspensa; k a mola; c o dispositivo mecânico (amortecedor); w e x variáveis que indicam a movimentação da base do sensor em relação a massa suspensa. Retirado de Collette *et al.*, 2011.

Os acelerômetros são sensores de aceleração que funcionam com o princípio da piezoelectricidade e medem a aceleração do terreno através de transdutores (figura 43). Estes, ao serem submetidos a movimentação do terreno, sofrem variação de pressão, gerando assim uma corrente elétrica correspondente à aceleração (Shrearer, 2009).

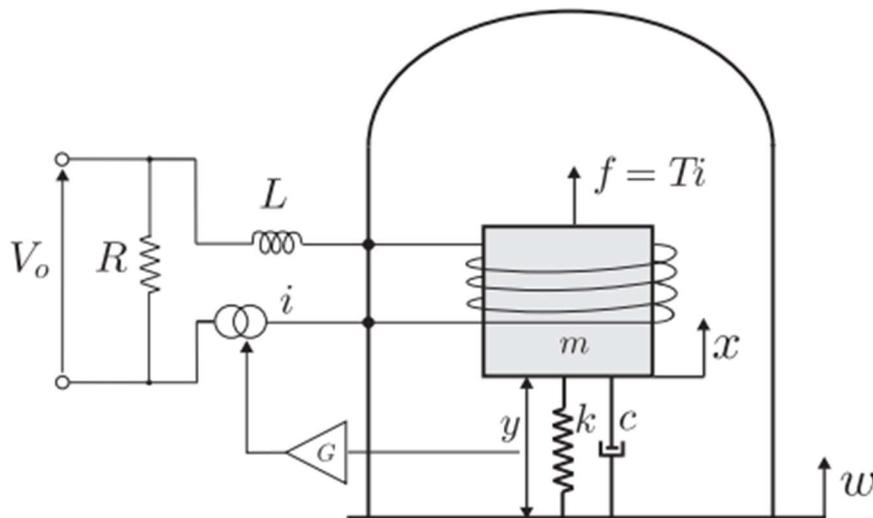


Figura 43: Princípio de funcionamento de um acelerômetro, sendo V_o a voltagem; R a resistência; L a indutância; m a massa suspensa; k a mola; c o dispositivo mecânico (amortecedor); w e x variáveis que indicam a movimentação da base do sensor em relação a massa suspensa. A força f é proporcional a voltagem (V_o) sobre a resistência (R). Retirado de Collette *et al.* (2011).

4.2.6.3 Monitoramento por Microsísmica Convencional

Depois de instalados os geofones, antes de dar como iniciado o sistema de monitoramento, é preciso configurá-lo de acordo com os limites de vibração estabelecidos para disparar alertas caso estes sejam ultrapassados.

Após essa etapa, as estações sismográficas passam a registrar os eventos sísmicos tanto naturais quanto induzidos e os usuários passam a ter acesso aos dados em tempo real através das plataformas de monitoramento.

O processamento dos dados adquiridos por este método é feito a partir da análise dos sismogramas e parâmetros da fonte, tentando identificar o que é resultado de ação antrópica e de eventos sísmicos naturais. Nesse sentido, a operação da mina e barragem tem como contribuir, já que esta pode informar os dias e horários de detonações e se há alguma movimentação humana próxima a alguma estação, o que permite correlacionar os eventos.

Em geral, próximo da área monitorada existe uma rede de sismógrafos que detecta de forma automática quaisquer terremotos que venham a ocorrer na região, localizando-os e determinando a sua magnitude. Sendo assim, para os casos em que

se desconfie que algum alerta possa ter sido disparado devido a algum sismo natural, há como consultar essa rede e verificar a sua ocorrência.

Ao se analisar um sismograma um dos itens que precisa ser levado em consideração é a sua atenuação, que corresponde à taxa de decaimento da amplitude para retornar ao nível basal (figura 44). Além disso, cada evento possui uma assinatura de onda específica e uma das feições típicas é o padrão de repetição de formas de onda. Malovichko (2012) aponta que explosões em geral são caracterizadas por uma repetição de sinais semelhantes, em um curto intervalo de tempo (figura 45).

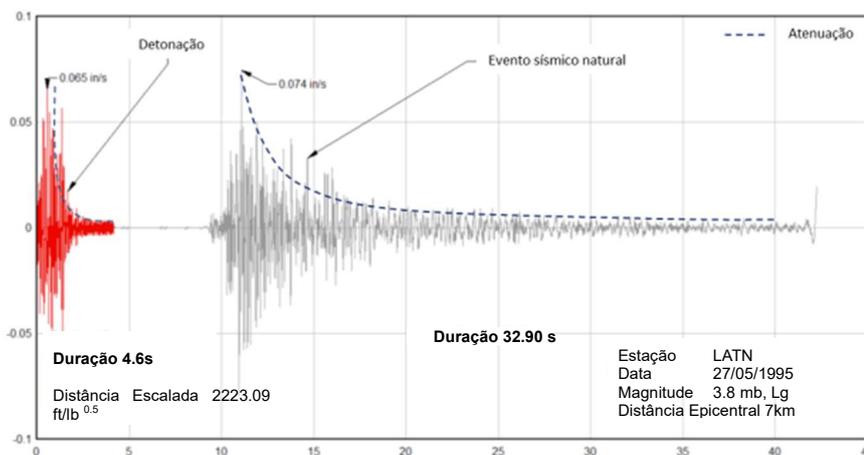


Figura 44: Exemplo de atenuação para eventos de desmonte. Adaptado de Silva-Castro, 2012.

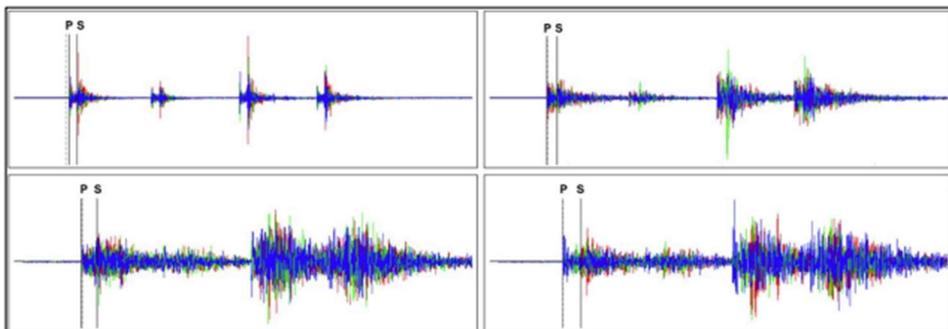


Figura 45: Sismogramas típicos de desmonte. Adaptado de Malovichko, 2012.

Xiao *et al* (2016) propuseram um passo a passo para o diagnóstico dos sinais microssísmicos e estes, de forma resumida, estão descritos a seguir:

- Coleções de sinais microssísmicos típicos de cada fonte que ocorrem durante a operação. Exemplo: detonação, perfuração, vibração mecânica etc.;

- Análise das características desses sinais (amplitude, duração, frequência e hora de chegada). É preciso estabelecer um banco de dados e atualizá-lo constantemente durante o monitoramento;
- Escolher o método de reconhecimento de um sinal. Pode ser feito através da: observação, mas a sua eficácia exige experiência do operador;
- Escolher um filtro para reduzir ou aumentar determinados aspectos do sinal.

Ainda no mesmo artigo, Xiao *et al* (2016) apresentam formas de onda associadas a diferentes fontes, como ilustrado na figura 46.

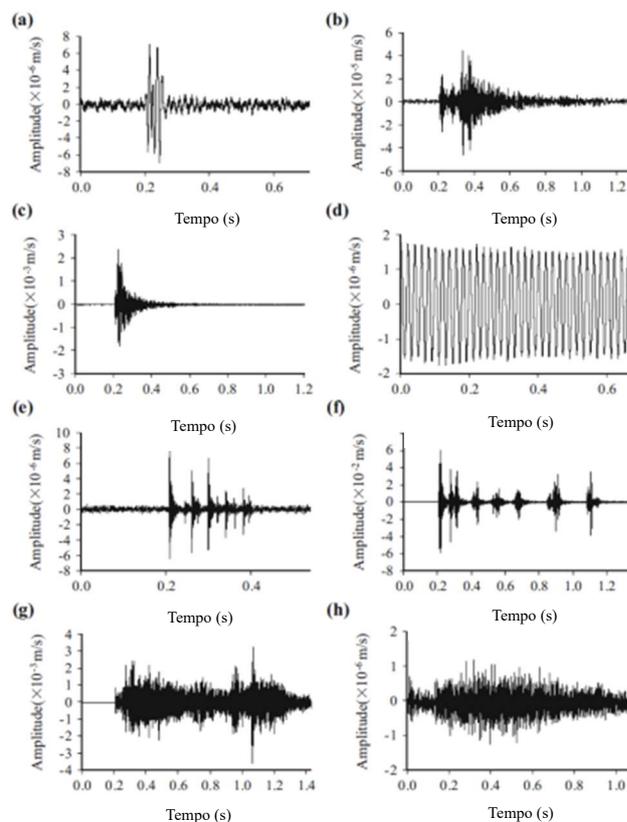


Figura 46: Exemplo de formas de ondas para diferentes fontes: (a) a (c) fraturamento de rocha; (d) ruído elétrico; (e) sondagem; (f) detonação; (g) vibração por desenvolvimento de túneis por TBM (Tunnel Boring Machine); e (h) passagem de equipamento pesado em um túnel. Retirado de Xiao et al. (2016).

4.2.6.4 Monitoramento por Interferometria Sísmica

A utilização do monitoramento passivo permite determinar os efeitos nas estruturas geotécnicas causados pelas atividades da mina (desmonte, por exemplo). Desta forma, é possível saber se houve algum dano a curto prazo, examinar como o maciço absorve os efeitos das ondas, examinar se existe alguma alteração de velocidade das ondas ou se estas velocidades voltam ao seu estado de normalidade,

comparando os valores medidos antes e depois do desmorte (figura 47). Caso exista algum dano permanente ao maciço no qual a barragem está inserida, haverá uma alteração permanente na velocidade sísmica monitorada após o desmorte.

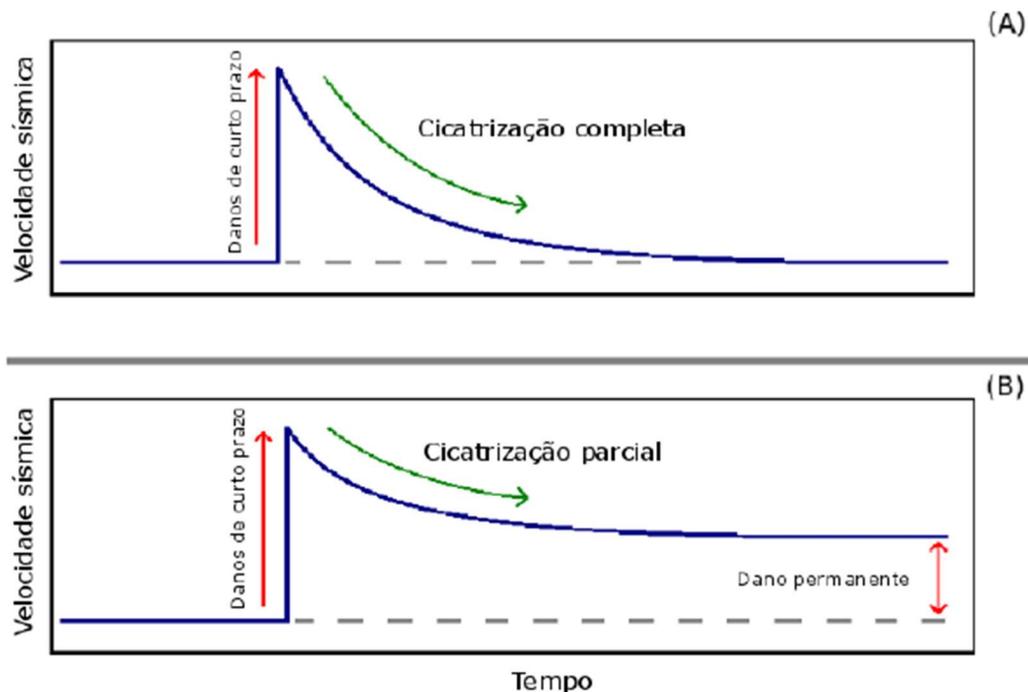


Figura 47:(A) A velocidade sísmica retoma seu estado de normalidade, configurando cicatrização completa; (B) A velocidade sísmica é alterada de forma permanente, configurando cicatrização parcial.

A velocidade em que as ondas irão se propagar está diretamente ligada à condição do meio físico. Quando mais danificado, menor a velocidade de propagação (Dias *et al*, 2016). Desta forma, é possível determinar as propriedades mecânicas do meio a partir da metodologia de monitoramento microssísmico (figura 48).

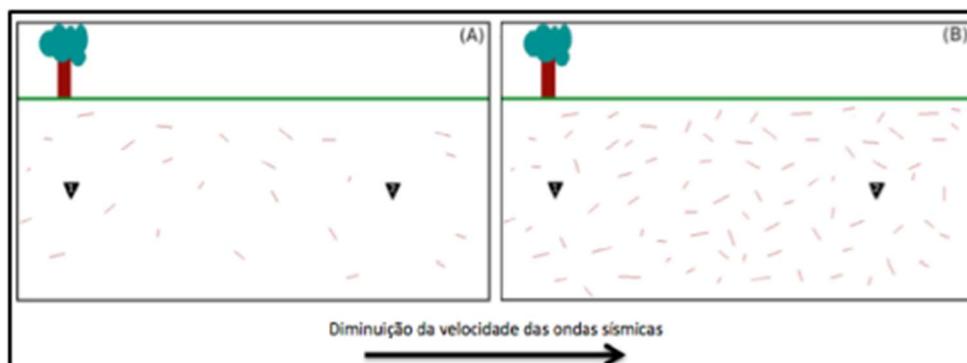


Figura 48: A figura ilustra a dependência da velocidade sísmica em materiais fraturados. (modificado de Dias *et al*, 2016).

Em meios homogêneos perfeitamente elásticos, todas as frequências viajam com a mesma velocidade. Já os meios atenuantes são dispersivos, fazendo com ondas de diferentes frequências viajem em velocidades diferentes (Mendecki, 2016).

Uma onda emitida a partir de fonte impulsiva se desloca ao longo de um eixo e gera uma resposta nos geofones em tempos diferentes. Ou seja, o tempo de viagem que essa onda leva para percorrer um par de geofones, que possui uma distância conhecida, permite estimar a velocidade de propagação da onda no meio.

Essa condição pode ser mais bem explicada com ajuda da figura 49. A onda gerada pela fonte impulsiva em $x=X_0$ e $t=t_0$, se desloca da direita para esquerda e atinge o receptor 1, no tempo t_1 . Após atingir o receptor 1, ela continua se propagando até chegar no receptor 2, no tempo t_2 . O tempo de viagem da onda do primeiro receptor ao segundo será o mesmo (t_2-t_1), considerando velocidade constante e o meio sem perda. Esta relação é obtida através da relação cruzada das respostas dos receptores e pode ser interpretada como a resposta de uma fonte no receptor 1 observada pelo receptor 2.

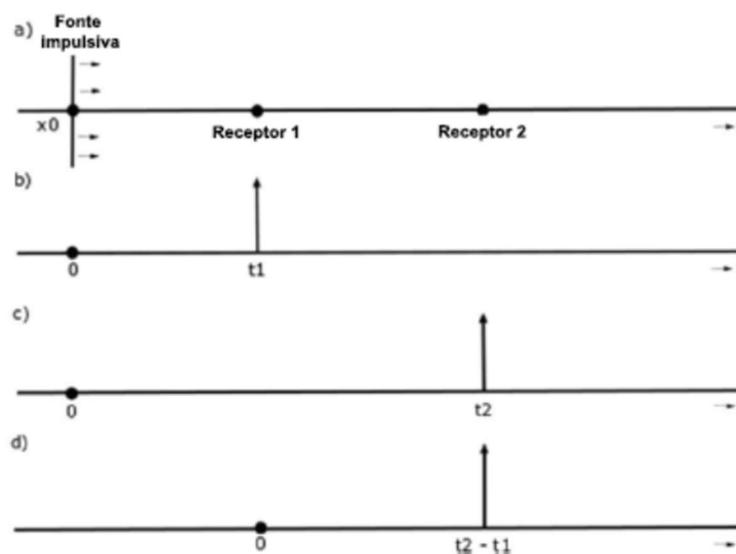


Figura 49: Representação da propagação de onda em um sistema microssísmico pela abordagem passiva. (a) Fonte impulsiva em $x = X_0$ e $t = t_0$. (b) A resposta no geofone 1, em $t = t_1$ (c) A resposta no geofone 2, em $t = t_2$. (d) Correlação cruzada. Retirado de Rodrigues *et al* (2020).

A correlação cruzada entre as respostas de dois receptores, nesse caso receptor 1 e 2 é uma das etapas da interferometria sísmica. O caminho da onda emitida em

x, tem como pontos em comum os receptores, o tempo de viagem entre eles é cancelado no processo de correlação, o que resulta no tempo de percurso entre os receptores, ou seja $t_2 - t_1 = (\text{receptor 2} - \text{receptor 1}) / \text{velocidade de propagação}$. Como pode ser observado, não é necessário saber informações sobre a posição da fonte impulsiva (Aguiar, 2021).

A segunda etapa diz respeito ao empilhamento dos correlogramas, gerados através das correlações cruzadas para assim refinar a razão sinal ruído, facilitar a identificação das feições nos correlogramas e aumentar a precisão das estimativas de correlação e variação de velocidade (Gomes, 2020).

4.2.6.4.1 Fenomenologia Física

Devido à grande sensibilidade que esta metodologia exige, já que é preciso identificar baixas variações de velocidade de propagação, utiliza-se a parte mais dispersiva do espectro de onda adquirido. Esse componente do espectro é chamado *coda waves* (Rodrigues, *et al* 2020).

Segundo Gomes (2020) a *coda wave* (ou cauda da onda), é uma fase mais espalhada/refletida inúmeras vezes no meio antes de ser registrada pela estação sísmográfica, o que resulta em uma alta sensibilidade para possíveis alterações de velocidade em subsuperfície.

Essas mudanças obtidas através das *coda waves* representam principalmente as mudanças de velocidade das ondas de cisalhamento (Snieder, 2006) e como estas não se propagam em meios líquidos, uma diminuição das velocidades está associada a mudanças na estrutura da barragem.

As ondas S seguem a lei física expressa por (retirada de Rosa Filho, 2002):

Equação 14

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

Sendo v_s a velocidade de propagação de onda S no meio, μ o módulo de cisalhamento, ρ a massa específica, E o módulo de elasticidade e σ o coeficiente de Poisson.

Assim, a diminuição da velocidade está associada à diminuição do módulo de cisalhamento e conseqüentemente à diminuição da resistência do material.

Desta maneira, esta técnica de monitoramento permite identificar processos de desestabilização dos barramentos, logo no seu início. Tendo em vista que, tipicamente, os sensores estão distribuídos ao longo da estrutura, é possível identificar a região em que há queda de velocidade e, com a ajuda da instrumentação, associada a inspeções visuais, viabilizar a reversão desse quadro antes que haja agravamento, prevenindo eventos catastróficos.

5 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e a discussão destes. Para tal, as seções de eletrorresistividade modeladas foram correlacionadas à instrumentação e ensaios de campo. Já no monitoramento microsísmico tentou-se determinar a fonte dos alertas disparados, de acordo com o sismograma gerado, levando em consideração a rede sismográfica regional, detonações das minas próximas às barragens e movimentação de maquinário.

5.1 Eletrorresistividade

O principal objetivo da campanha geométrica foi mapear a barragem, para assim servir de apoio à caracterização geológica, além de verificar as condições de saturação desses materiais em subsuperfície.

Esse levantamento foi executado em maio de 2022, antes do começo das obras de descaracterização das barragens 1A e 1B, na porção NE da Barragem 1B.

Ao todo, foram coletados 1,66 km de seções 2D de eletrorresistividade com eletrodos dispostos em arranjo dipolo-dipolo com 10 m de espaçamento distribuídos em seções 2D conforme especificado na figura 50. Esse arranjo e espaçamento dos eletrodos atingiu 8 níveis de profundidade possibilitando a investigação de até 35 m abaixo do terreno. Na mesma figura, foram plotadas duas seções geológicas paralelas às seções transversais de eletrorresistividade, onde foi possível fazer comparações e verificar a correlação entre os materiais constituintes da barragem e os valores de resistividade obtidos



Figura 50: Distribuição das seções. Fonte: Google Earth.

No geral, 6 seções foram levantadas: a L9 na crista, a L6 no corpo (em uma das bermas, a jusante da crista), a L10 no reservatório sobre os rejeitos e outras 3 executadas transversalmente à barragem, perpendiculares ao dique (Tabela 3). Essas seções transversais foram comparadas às 2 seções geológicas disponíveis. A figura 51 indica as condições em que as aquisições de dados foram obtidas.

Tabela 3: Orientação e comprimento das seções de ERT.

Linha	Azimute (graus)	Comprimento (m)
L6	330	330
L9	330	400
L10	330	450
T9	60	160
T10	60	160
T10A	60	160
Total		1660

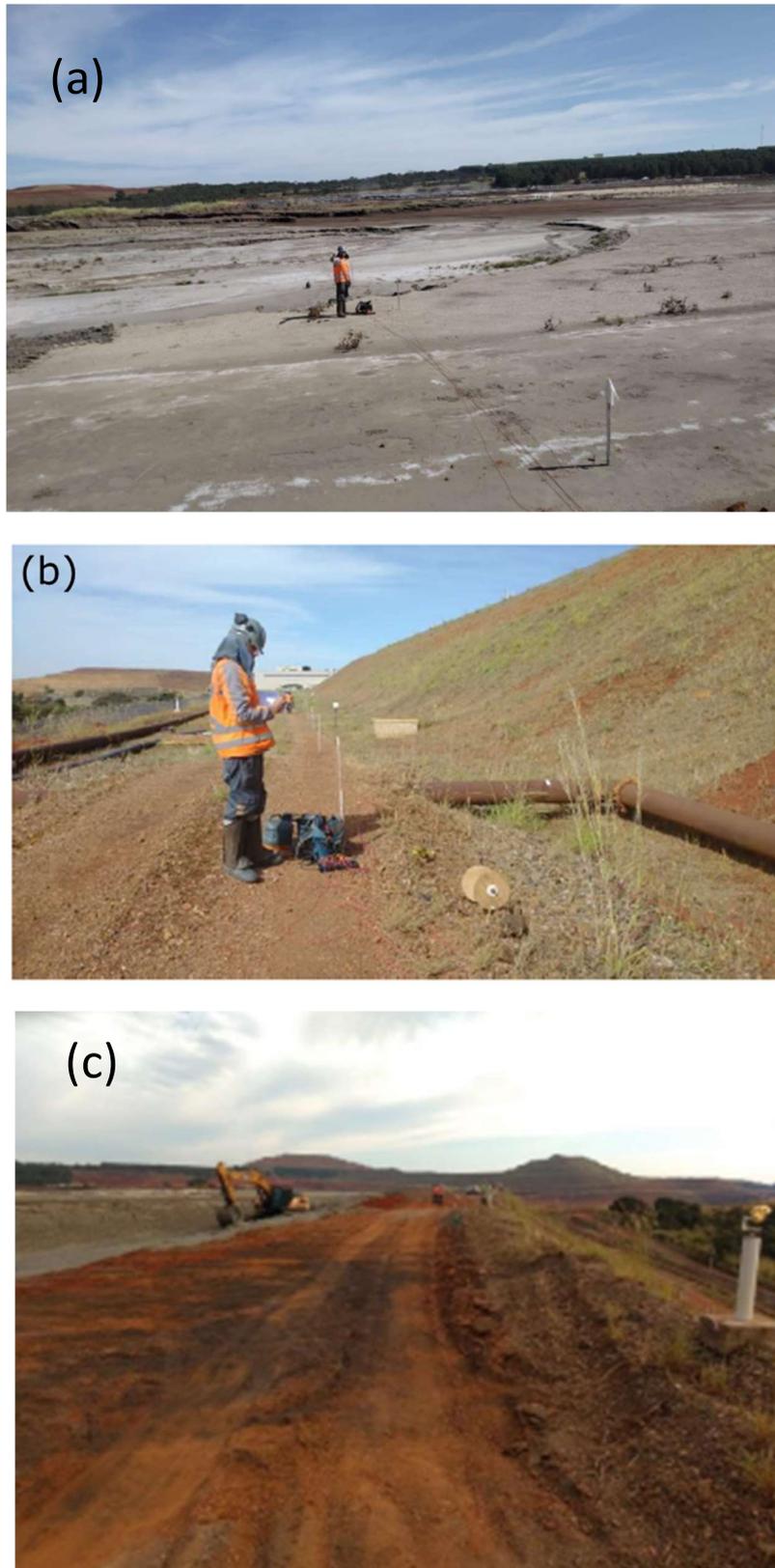


Figura 51: Condições do local onde foi executado o levantamento: (a) Linha T10, (b) linhas L6, (c) Linha L9.

5.1.1 Seções de Eletrorresistividade

As 6 seções de eletrorresistividade obtidas estão apresentadas na figura 52 em 3D em conjunto com as curvas de nível da barragem e a superfície do lençol freático obtida a partir dos INAs, PMs e DH (figura 52). A superfície freática aqui proposta apresentou boa correlação com as zonas condutivas mais profundas nas seções paralelas ao dique da barragem.

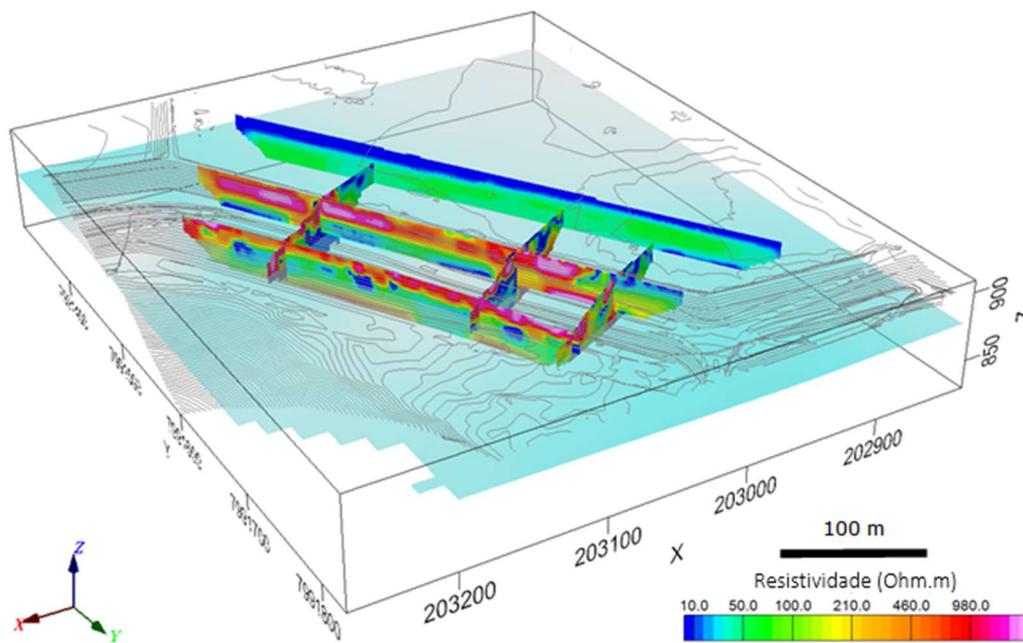


Figura 52: Localização das seções de eletrorresistividade na barragem 1B: seções - ver escala de cores; lençol freático em azul claro e curvas de nível em cinza.

Na seção T9, (figura 53) executada transversal à crista da barragem 1B, a cerca de 125 m a NW da separação entre as barragens 1B e 1A, podemos notar uma diferença significativa entre a cota de nível d'água indicada pelos INA's e a carga total apontada pelos piezômetros, esta diferença se atenua a jusante.

Correlacionada a seção T9, a seção típica contendo a posição dos CPTu's e dos instrumentos próximos, além da seção modelada referente a campanha de eletrorresistividade realizada em 2020 (próxima a estaca 220 m) segue apresentada na figura 54.

Na região central da seção, no trecho correspondente ao dique, o CPTU-1B-002 (cota 894,20 m) penetrou o maciço de solo compactado e a classificação deste material foi denominada como silte arenoso/areia siltosa, com lente de solo argiloso entre 2 e 6 m e areia/areia siltosa entre 8 e 10 m (aproximadamente), com altos valores de resistência de ponta.

Ainda no centro da seção, abaixo da camada resistiva, uma anomalia condutiva com valores abaixo de 10 Ohm m foi identificada. Essa região corresponde ao rejeito e a continuidade do CPTU-1B-002 mostra que entre 26 m e 34 m de profundidade (cota 868,20 m e 860,20 m) houve um aumento significativo da poropressão, onde foram realizados 2 ensaios de dissipação.

Outro ensaio de CPTu (CPTU-1B-003, cota 905,39 m) foi realizado próximo a esta seção, na região da crista e como os 20 m iniciais foram tradados (ultrapassando o depósito de escalpe), todo o material investigado por este ensaio é relativo ao rejeito. Este CPTu mostra que em 20 m e 24 m (cota 885,39 m e 881,39 m respectivamente) há um aumento da poropressão, sendo realizado dois ensaios de dissipação neste intervalo. A partir de 36 m de profundidade (cota 869,39 m) até 51,40 m (final da perfuração) há sucessivos aumentos de poropressão, chegando a 1.500 kPa.

Outra camada condutiva aparece próximo à superfície, a montante da crista (no reservatório de rejeitos), se estendendo até 10m de profundidade. Abaixo desta, os valores resistividade aumentam, porém não significativamente, chegando a 100 Ohm aproximadamente.

A jusante da crista, a partir das coordenadas 203.140 E e 7.991.520 N, as camadas investigadas apresentam, predominantemente alta resistividade. Nesta região, o ensaio CPTU-1B-015 (cota 877,44 m) foi executado e a partir de 6,5 m a resistência de ponta e o atrito lateral se comportam de forma semelhante, aumentando progressivamente a partir de 12 m de profundidade (cota 865,44 m) e com pico em 30 m.

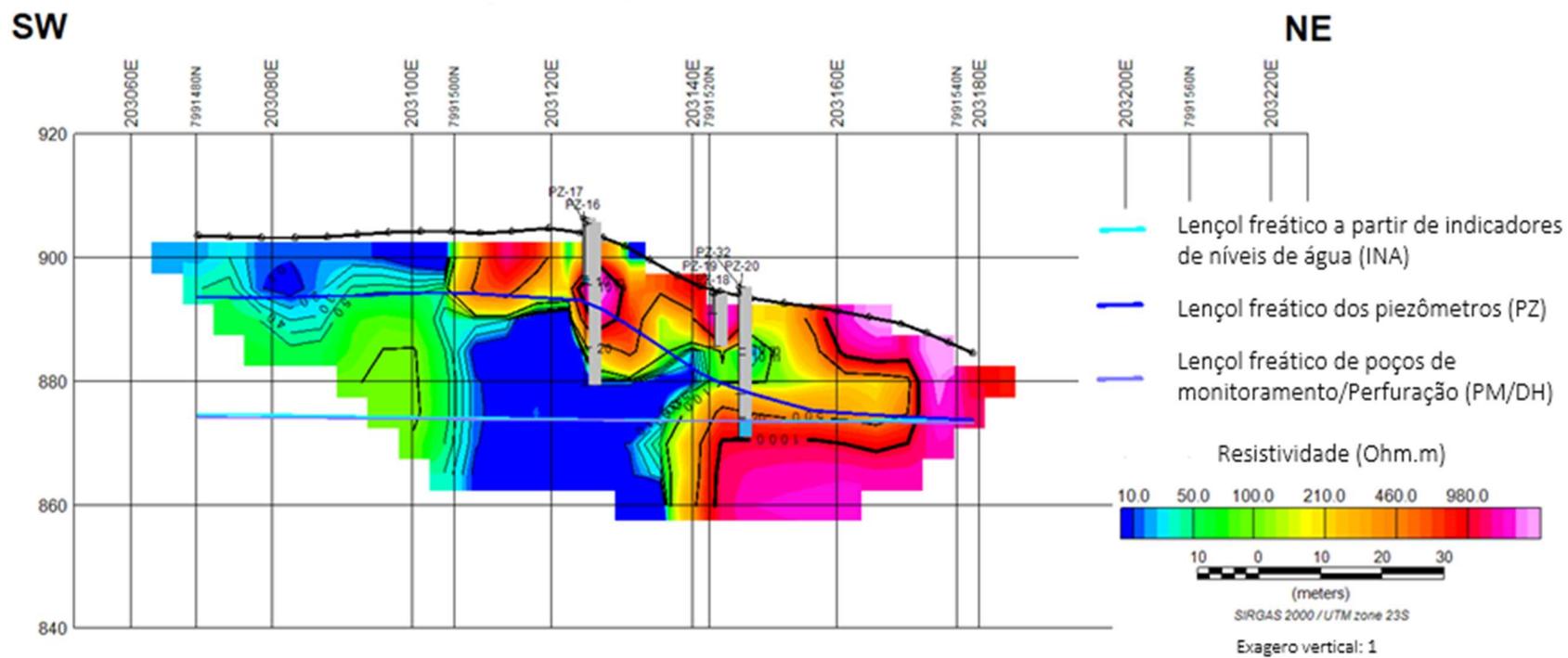


Figura 53: Seção T9, região com alta resistividade à direita e anomalia condutiva a esquerda.

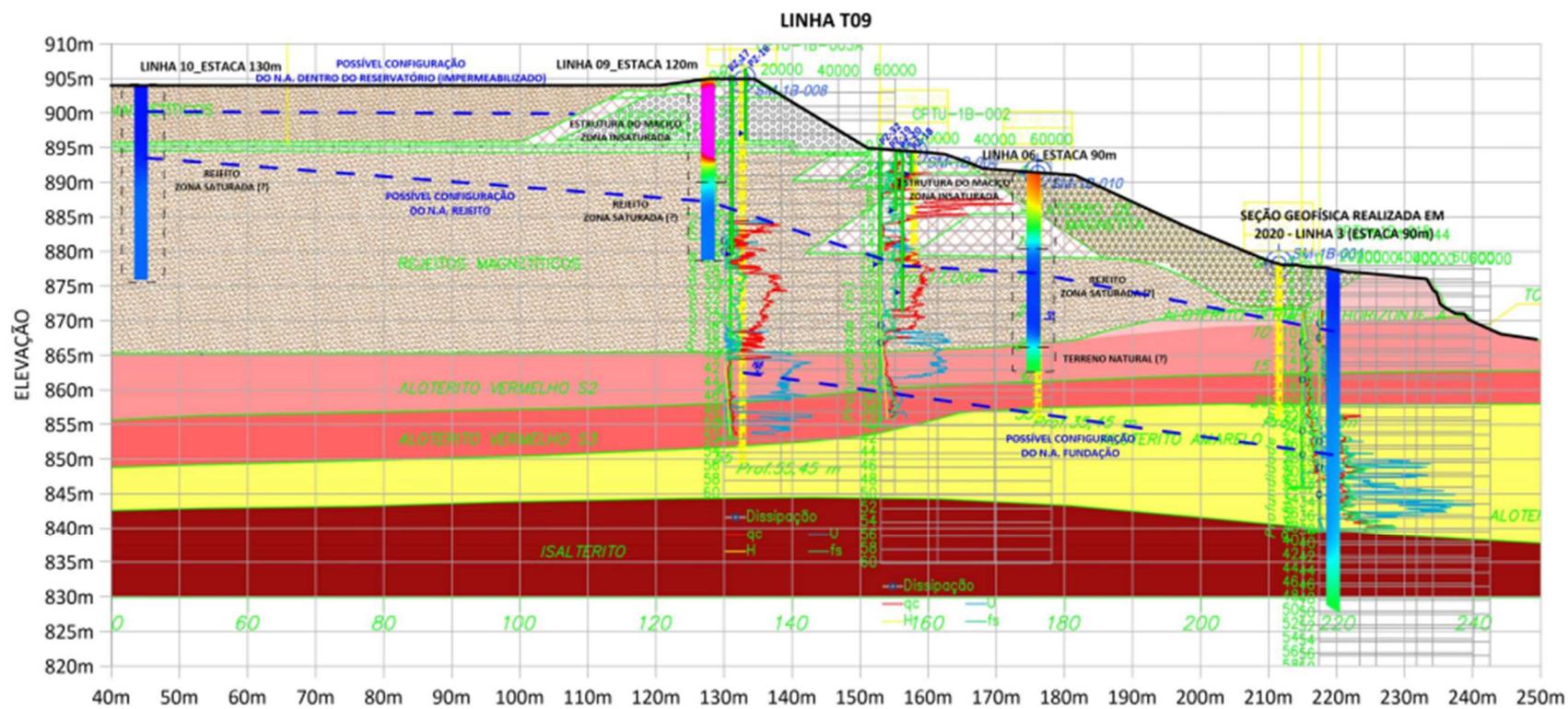


Figura 54: Seção típica da Barragem 1B, correlacionada a seção T9.

A seção T10A foi levantada a cerca de 150 m a NW da T9, também perpendicular à crista (figura 55). Assim como a seção T9, também apresenta anomalia condutiva próximo à crista (valores abaixo de 30 Ohm·m), abaixo de material resistivo e superficialmente, na região do reservatório até 20 m de profundidade. A superfície do terreno, a jusante e na crista, é marcada por material resistivo, com valores de resistividade maiores que na seção T9.

A seção T10 foi levantada a 70 de distância a NW da T10A e corta a crista da barragem. A anomalia condutiva, localizada no reservatório, apresenta valores de resistividade abaixo de 10 Ohm m, se estendendo em profundidade até a base da seção. Abaixo da crista, outra anomalia condutiva aparece, porém de menor tamanho, com valores de resistividade entre 50 e 150 Ohm m, a 30 m abaixo da superfície.

Conforme pode ser observado na figura 56 (linha T10), os materiais mais resistivos correspondem à estrutura do maciço da barragem. Abaixo desta camada, no rejeito, os valores de resistividade diminuem até 210 Ohm. Nesta região, o ensaio CPTU-1B-017 (cota 905,46 m) foi executado. Devido ao depósito de escalpe, os 10 m iniciais foram tradados e a partir daí a investigação foi iniciada. Entre 10 e 32 m de profundidade a resistência de ponta e atrito lateral apresentaram comportamento semelhante, com picos entre 10 e 12 m, valores mais altos até 28 m (com exceção de camada de argila entre 18 e 19 m) e baixos valores entre 28 e 32 m. A poropressão apresentou picos, chegando a 80 kPa (aproximadamente) entre 10 e 24 m. A partir de 28 m, a poropressão aumentou progressivamente até 40 m (com valor máximo de 170 kPa neste ponto).

A seção típica que é correlacionada à seção T10 segue apresentada na figura 57. Nela, é possível verificar a posição dos CPTu's, dos instrumentos próximos e da seção modelada da campanha de eletrorresistividade realizada em 2020 (próxima à estaca 220 m).

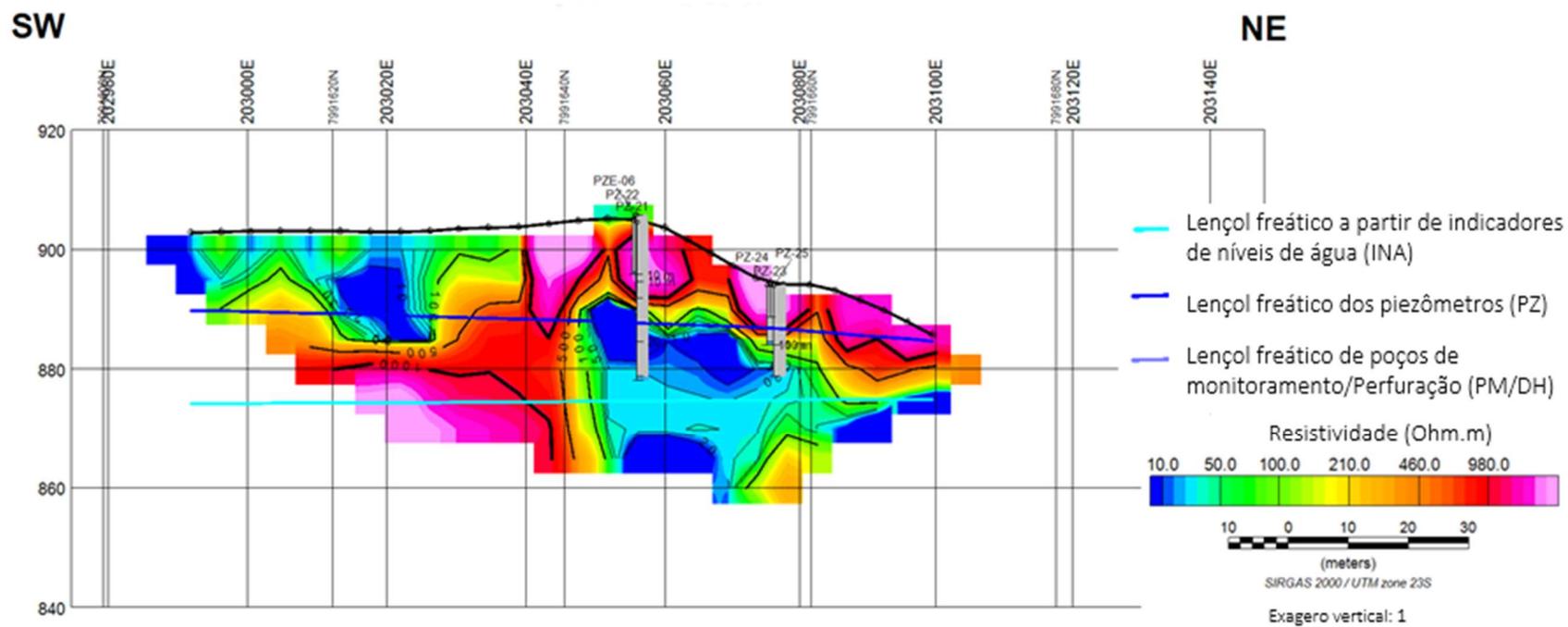


Figura 55: Seção T10A, perpendicular a crista apresentando anomalia condutiva abaixo de material resistivo.

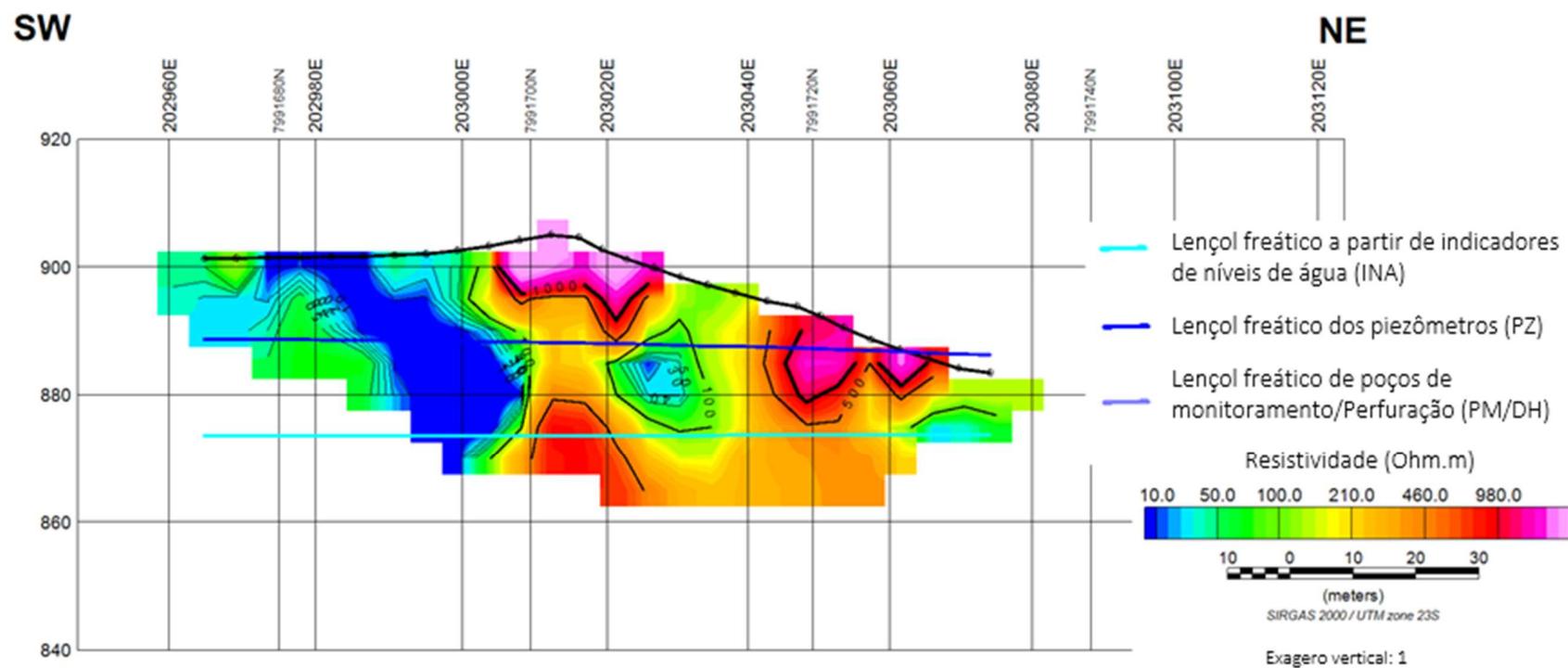


Figura 56: Seção T10 com anomalia condutiva a direita.

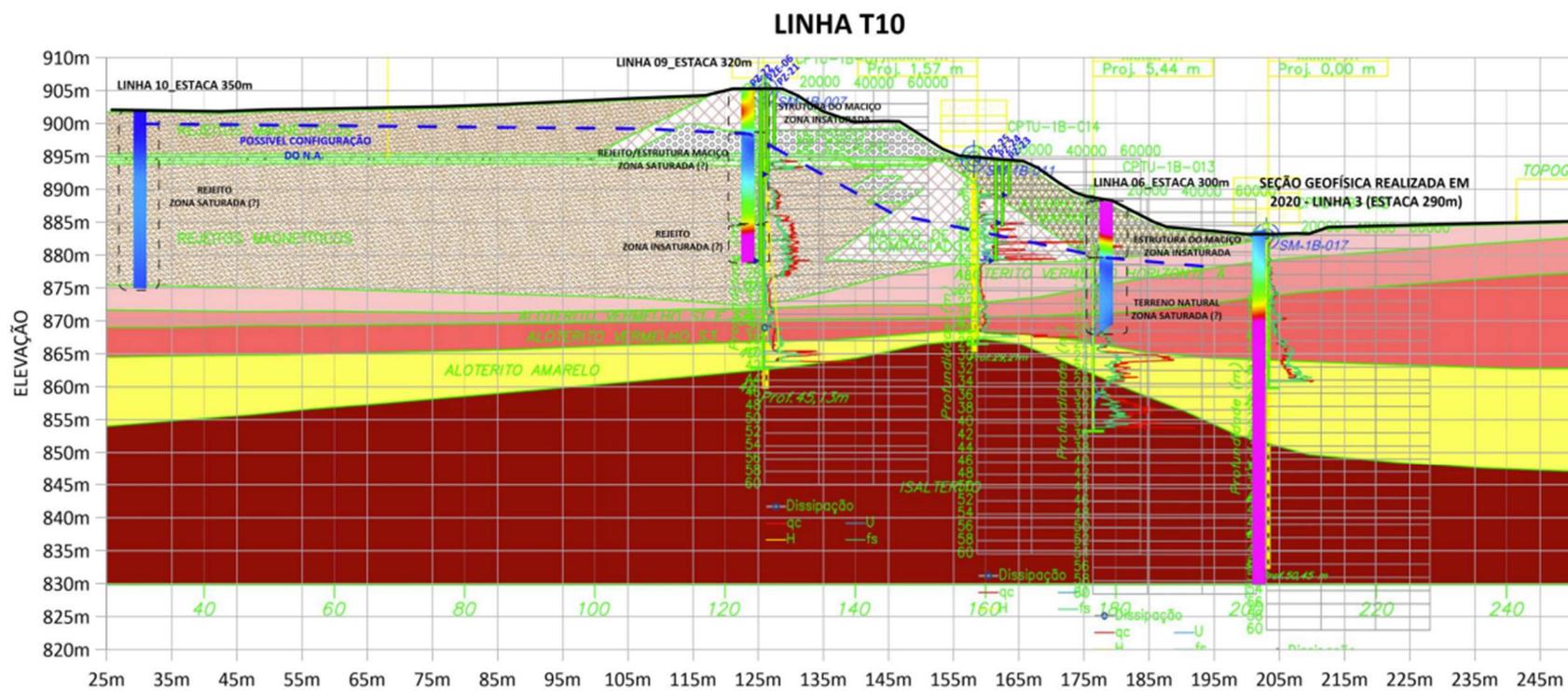


Figura 57: Seção típica correlacionada à seção T10.

A seção longitudinal L6 (figura 58) apresenta 330m de extensão, com direção SE-NW, no corpo da barragem, a jusante da crista. O material mais resistivo encontra-se contínuo, aflorante, se estendendo até cerca de 12 m de profundidade. Acompanhando a superfície freática (estabelecida a partir dos INA's), abaixo desta camada resistiva, surge uma anomalia condutiva apresentando formato alongado.

A cerca de 20 m de profundidade, abaixo da anomalia condutiva, há nova camada resistiva, exceto no trecho próximo às coordenadas 203.100E, 7.991.640N, onde a anomalia condutiva se aprofunda até a base da seção, com valores abaixo de 50 Ohm.m.

Localizada na crista da barragem (figura 59), a seção L9 apresenta camada superficial resistiva, se estendendo até 20 m de profundidade, aproximadamente. A SE da seção, ocorre mudança abrupta para material condutivo, com valores abaixo de 30 Ohm.m. Anomalias condutivas descontínuas podem ser observadas abaixo do material resistivo desde o extremo SE até a coordenada 203.060E, onde os valores de resistividade aumentam até mais de 1000 Ohm·m em profundidade.

A seção L10 (figura 60) foi levantada sobre o reservatório de rejeitos e apresenta os menores valores de resistividade em comparação às demais seções. Nela, podemos observar dois domínios, um mais superficial, com valores abaixo de 20 Ohm.m e 10 m de espessura, e outro, com valores de resistividade intermediários, entre 20 e 100 Ohm.m. A NW da seção, nova anomalia condutiva pode ser observada, apresentando baixos valores de resistividade (abaixo de 20 Ohm.m).

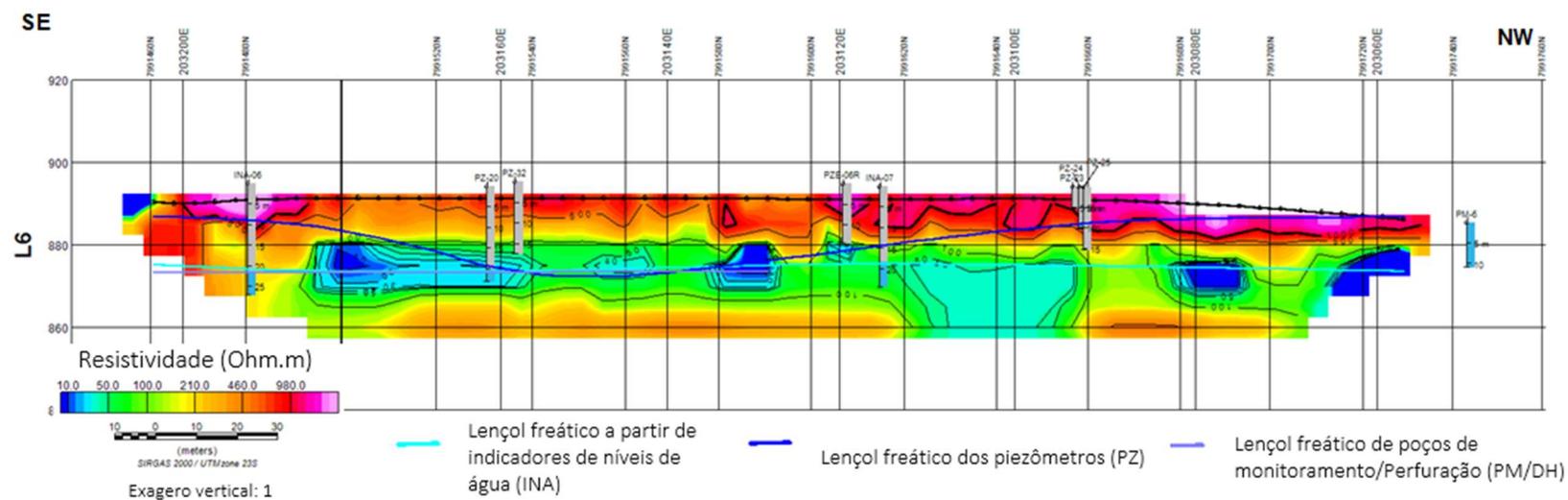


Figura 58: Seção L6, longitudinal com material resistivo contínuo e aflorante.

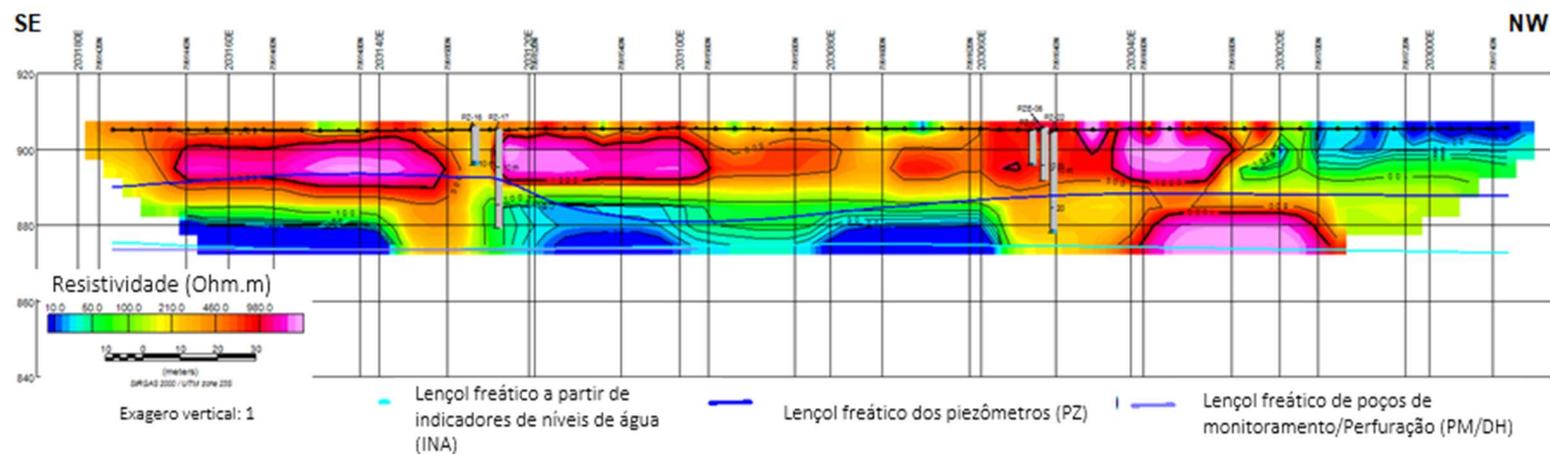


Figura 59: Seção L9, camada superficial resistiva e contínua até mudança abrupta para material condutivo (a direita).

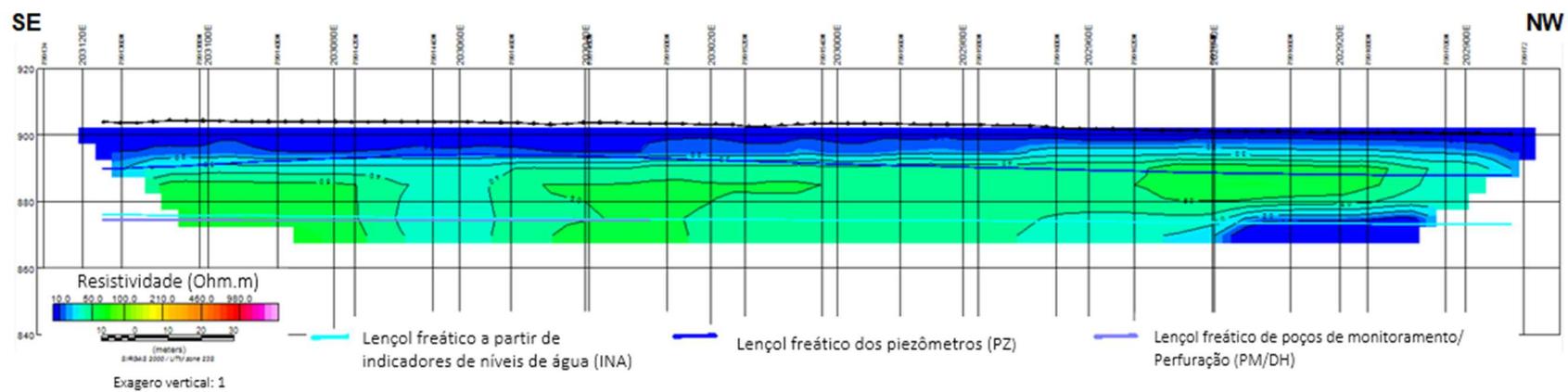


Figura 60: Seção L10, levantada acima do reservatório, com camada superficial condutiva.

5.1.2 Discussão

A partir das seções levantadas foi feita uma correlação dos valores de resistividade das camadas com os materiais que compõem a barragem. Assim, foi possível estabelecer alguns pontos que merecem atenção. O critério utilizado para definir esses pontos diz respeito a baixos valores de resistividade em regiões em que esta condição pode levar a instabilidade do maciço. Ao todo, foram identificados 4 pontos, apresentados na figura 61.

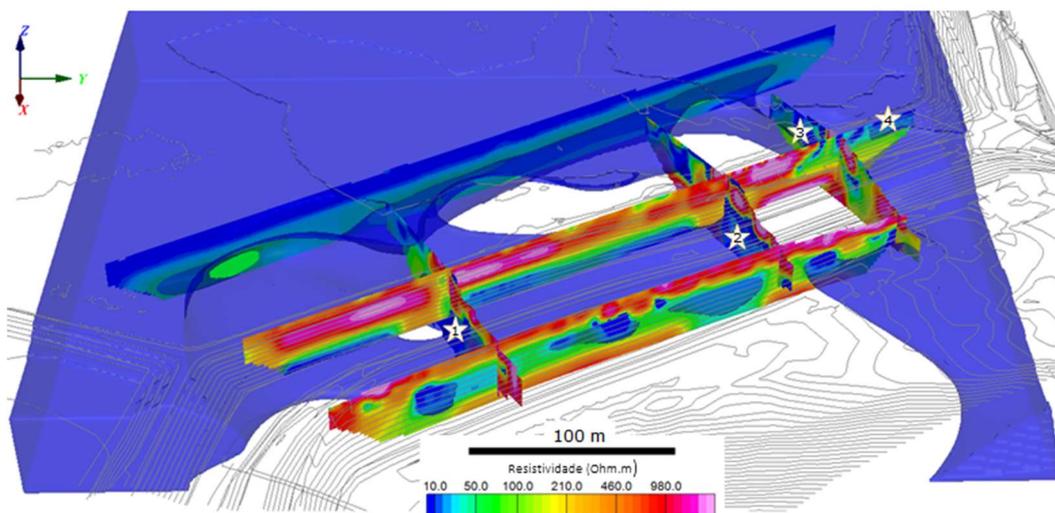


Figura 61: Seções de eletrorresistividade com a superfície que contém os valores abaixo de 50 Ohm.m e as zonas de atenção descritas no texto: (1) seção T9, (2) seção T10A, (3) seção T10 e (4) seção L6.

As seções transversais (T9, T10 e T10A), mostraram altos valores de resistividade (acima de 100 Ohm.m) em camadas superficiais. Esta condição está de acordo com os materiais utilizados no alteamento da barragem (solo compactado, depósito de escalpe e aterro de magnetita) já que este tem a função de atuar como um dreno (aterro de magnetita e depósito de escalpe) e barreira impermeável (solo compactado).

Um tapete drenante horizontal foi instalado no reservatório na cota 895 m. O material de preenchimento desse reservatório corresponde aos rejeitos magnéticos. Na seção T9, a SE da seção, é possível notar que esse tapete parece limitar uma zona condutiva superficial, o que corresponderia ao rejeito mais úmido. No entanto, abaixo da crista há uma forte anomalia condutiva (valores abaixo de 10 Ohm.m), que merece atenção (figura 62, ponto 1).

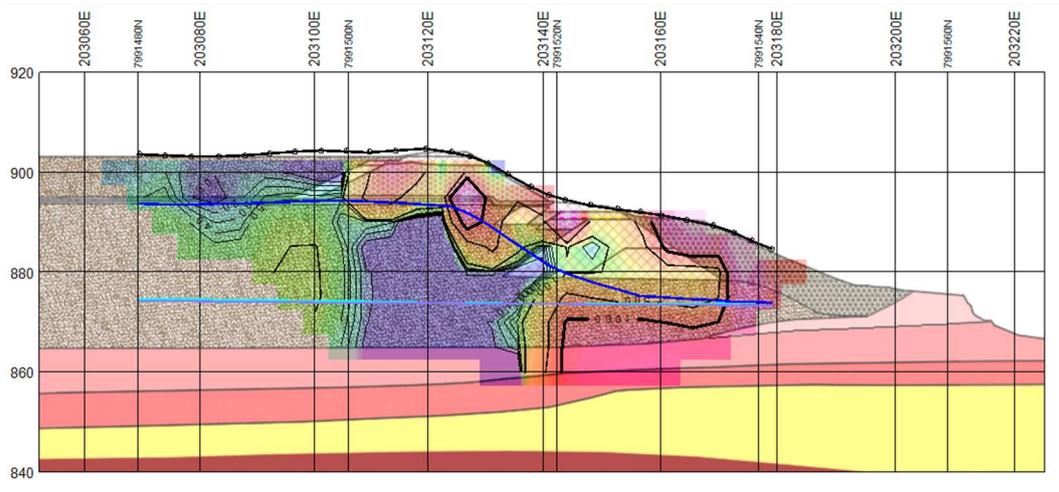


Figura 62: Seção T9 (SE-NW), superposta à seção geológica 15-15'.

A seção T10A apresenta feições semelhantes às outras, porém a anomalia condutiva que aparece na região do reservatório parece se aprofundar além do tapete drenante. O material condutivo localizado abaixo da crista também é observado nesta seção, ainda que mais incipiente e está deslocado a jusante. Esta condição caracteriza mais um ponto de atenção (figura 63, ponto 2).

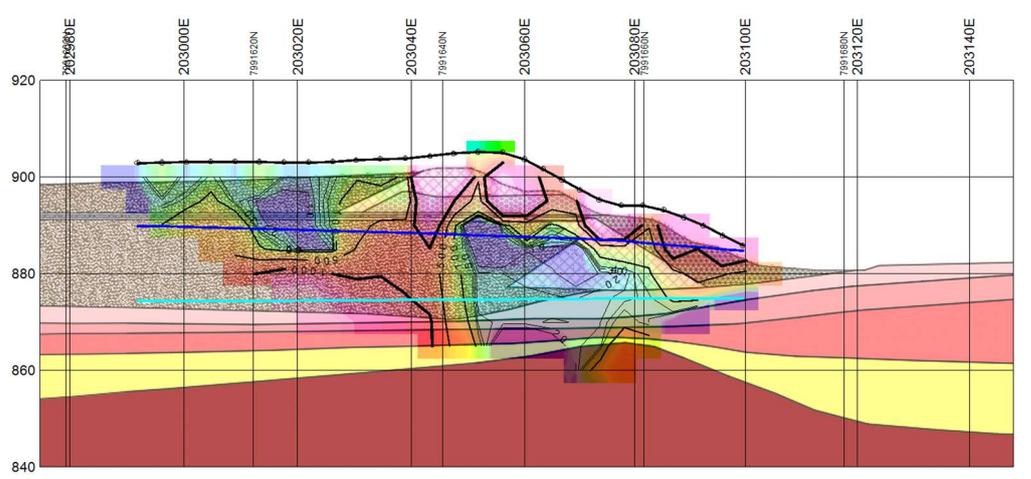


Figura 63: Seção T10A (SE-NW) superposta à projeção da seção geológica 16-16'.

Na seção T10, o material condutivo abaixo da crista praticamente desapareceu, no entanto, na região do reservatório há uma forte anomalia condutiva que se estende até a base da seção. Essa condição pode indicar que o tapete drenante perdeu a função e por isso, temos mais um ponto de atenção (ponto 3, figura 64).

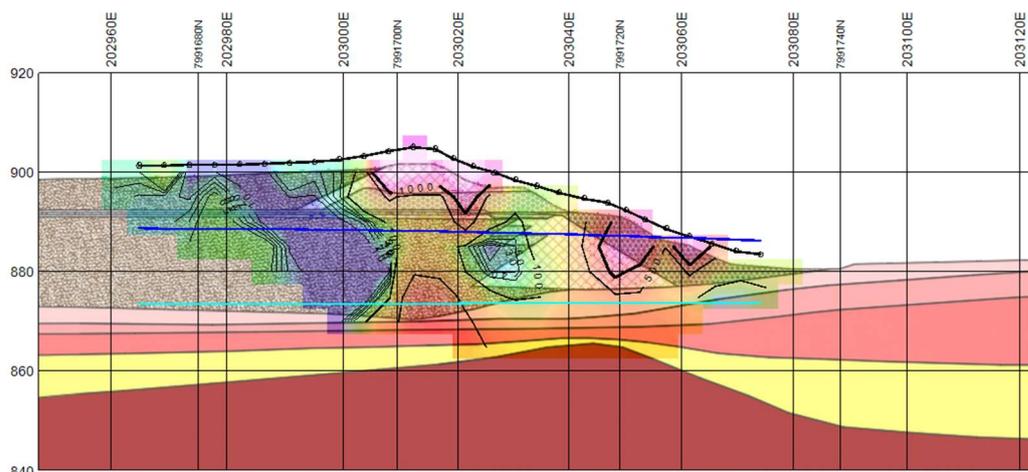


Figura 64: Seção T10 (SW-NE) superposta à projeção da seção geológica 16-16'.

Outra questão a ser abordada é que, quando comparados a outras pesquisas (Albuquerque *et al*, 2019; Oliveira *et al*, 2023; Da Rocha *et al*, 2019 e Malagutti Filho *et al* 2018), os resultados obtidos a partir desta campanha envolvem valores de resistividade que são, em geral mais baixos. As camadas classificadas pouco resistivas apresentaram valores inferiores a 30 ohm.m, as intermediárias até 200 ohm.m (aproximadamente) e as altamente resistivas quando muito, chegam a 1000 ohm.m. Essa questão pode estar relacionada com a composição mineralógica do rejeito e sua porosidade.

A partir da análise das leituras obtidas através dos piezômetros e das seções modeladas foi avaliada a possibilidade de haver fluxo de água na barragem. Como pode ser observado na figura 37, referente à seção T9, há uma diferença entre a linha traçada indicando as cotas das leituras dos piezômetros (azul escuro) e dos INA's (azul claro). Essa diferença vai sendo atenuada a jusante, onde a linha em azul escuro parece contornar a anomalia condutiva localizada abaixo da crista, chegando a coincidir. Essa condição foi interpretada como sendo resultado de um fluxo do reservatório em direção ao talude.

Embora nesta seção T9 a anomalia condutiva não se estenda ao talude, já que este apresentou valores mais altos de resistividade (acima de 980 Ohm), na seção T10A, L6 e L9 há presença de camadas condutivas nesta região. Essa condição foi interpretada como um indício do processo de percolação no talude.

Para ajudar nesta avaliação foi gerada uma imagem em 3D das seções executadas (figura 65) com uma superfície modelada a partir das leituras dos piezômetros. Como pode ser verificado, a superfície criada parece acompanhar as camadas condutivas. O que reforça a atuação dos processos de percolação e fluxo de água.

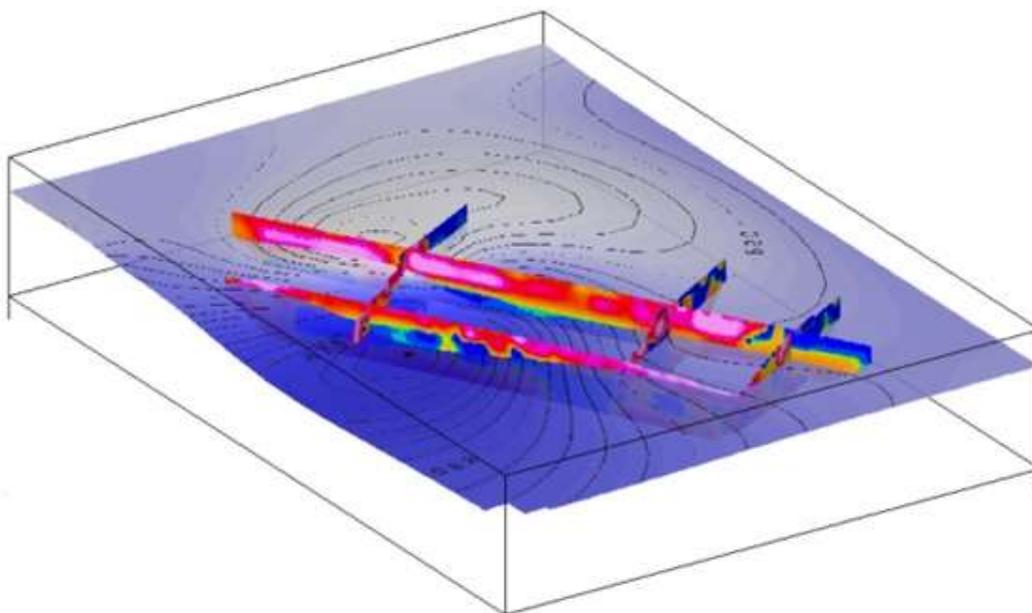


Figura 65: Imagem em 3D das seções eletrorresistivas com a superfície modelada a partir das leituras dos piezômetros.

A campanha de eletrorresistividade foi executada antes do início das obras de descaracterização. Assim, ainda que a barragem 1B tenha apresentado indícios de processo de percolação e fluxo na época do levantamento, ao final das obras esta não mais operará como estrutura de contenção de rejeitos, perdendo as características de barragem de mineração.

5.2 Microssísmica

O monitoramento microssísmico foi realizado nas barragens 1A/1B e 2A/2B pelo método convencional e por interferometria sísmica. Os dados obtidos a partir deste estudo seguem descritos a seguir.

5.2.1 Convencional

O sistema de monitoramento visa o funcionamento ininterrupto do instrumento a fim de viabilizar um fornecimento *realtime* de gráficos referentes aos dados de aceleração e velocidade (PGA e PGV) coletados, facilitando assim a avaliação de danos à estrutura da barragem após os eventos sísmicos registrados, sejam estes naturais ou antrópicos. A visão geral do serviço de monitoramento micro sísmico está evidenciada na figura 66.

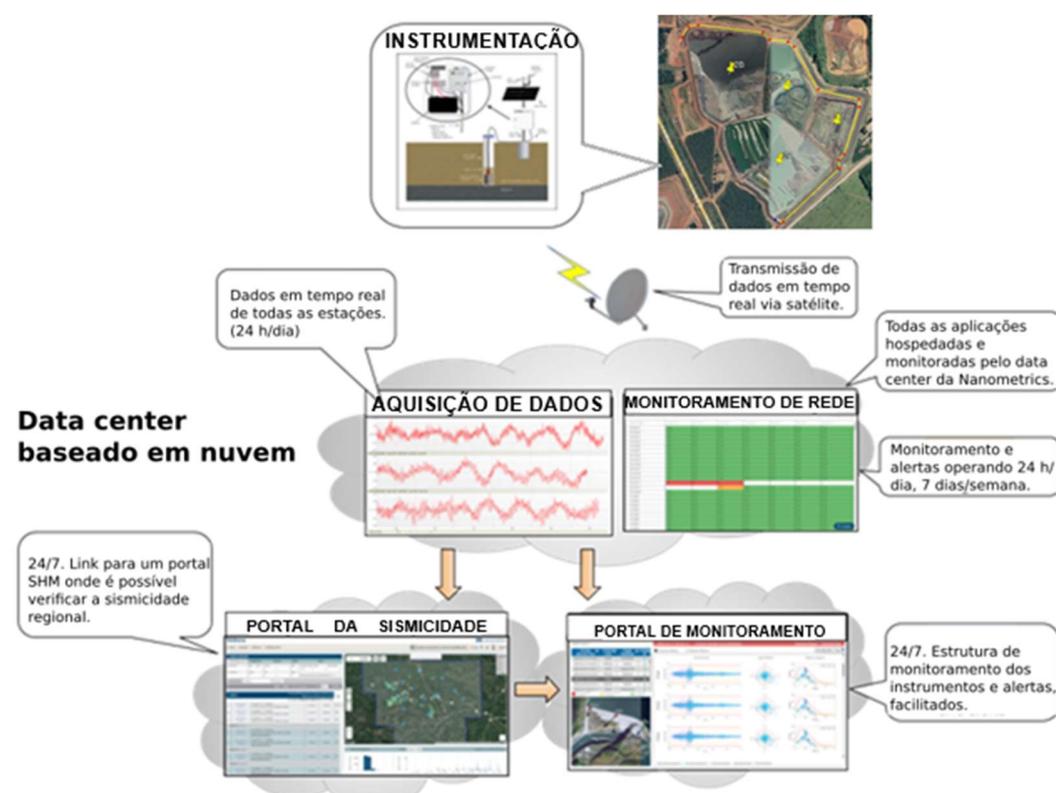


Figura 66: Resumo do serviço de monitoramento micro sísmico.

Durante o período de 10 de agosto a 1 de novembro de 2022 o monitoramento se deu apenas com 4 estações sismográficas remotas (figura 67), instaladas em 18 de maio de 2022 em caráter emergencial, visando garantir a segurança durante as fases iniciais do descomissionamento. Estas estações permaneceram em operação 24 horas por dia, 7 dias por semana até que fossem substituídas pela atual rede de monitoramento.



Figura 67: Localização das 4 estações emergenciais.

No dia 22 de outubro de 2022 a implantação de um novo sistema de monitoramento foi concluída e a antiga rede foi paulatinamente desmobilizada. Essa nova rede conta com 15 estações sismográficas (10 geofones e 5 acelerômetros), com abordagem microssísmica, configuradas de acordo a emitir alertas para uma determinada amplitude de vibração registrada. Cada estação sismográfica é composta de acelerômetros Titan ou geofones triaxiais de 4,5 Hz, enterrados a uma profundidade de aproximadamente 50 cm e ligados por cabo à sua respectiva unidade de gravação de dados. A localização dessas estações segue apresentada na figura 68.

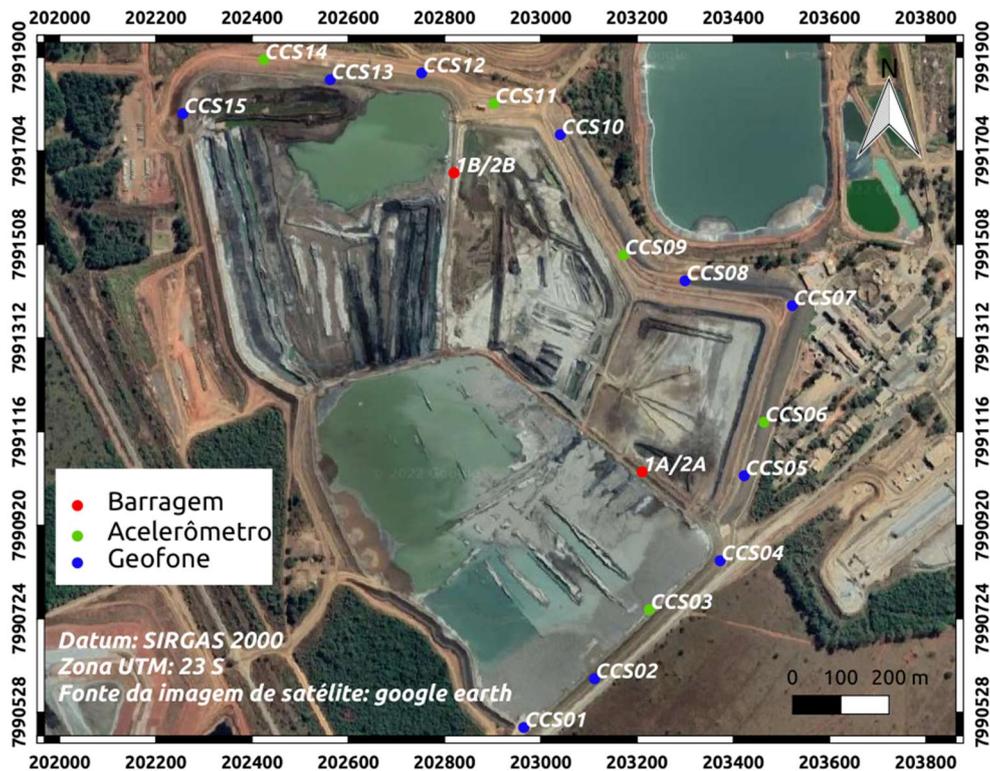


Figura 68: Localização das estações sismográficas.

Para que os alertas sejam emitidos é preciso configurar os limites de aceleração e a quantidade de estações que excederam esses limites. Quando se trata de avaliar a estabilidade de uma estrutura, os critérios para vibração vertical são diferentes dos para vibração horizontal. Assim, ao se atingir as condições estabelecidas serão disparados e-mails (de acordo com os endereços cadastrados) com os gráficos dos picos de PGV e PGA. Tais alertas foram divididos entre aviso (em amarelo) e emergência (vermelho) cujos respectivos valores encontram-se indicados na tabela 4.

Tabela 4: Limiares em fração de g para emissão de alerta de evento sísmico. Vermelho: emergência. Amarelo: aviso.

Barragem 1A/2A:	Barragem 1B/2B:
Aceleração horizontal (ah) = 0,029 g	Aceleração horizontal (ah) = 0,120 g
Aceleração vertical (av) = 0,040 g	Aceleração vertical (av) = 0,040 g
Aceleração horizontal (ah) = 0,014 g	Aceleração horizontal (ah) = 0,06 g
Aceleração vertical (av) = 0,020 g	Aceleração vertical (av) = 0,020 g

Com objetivo de garantir a funcionabilidade do sistema foram feitos testes com martelo. Os testes consistem em aplicar golpes com o martelo próximo a alguma estação sismográfica afim de verificar se haverá algum registro de alerta. Como pode ser observado na figura 69, os limites programados foram excedidos, o que significa que os sensores funcionaram como esperado.

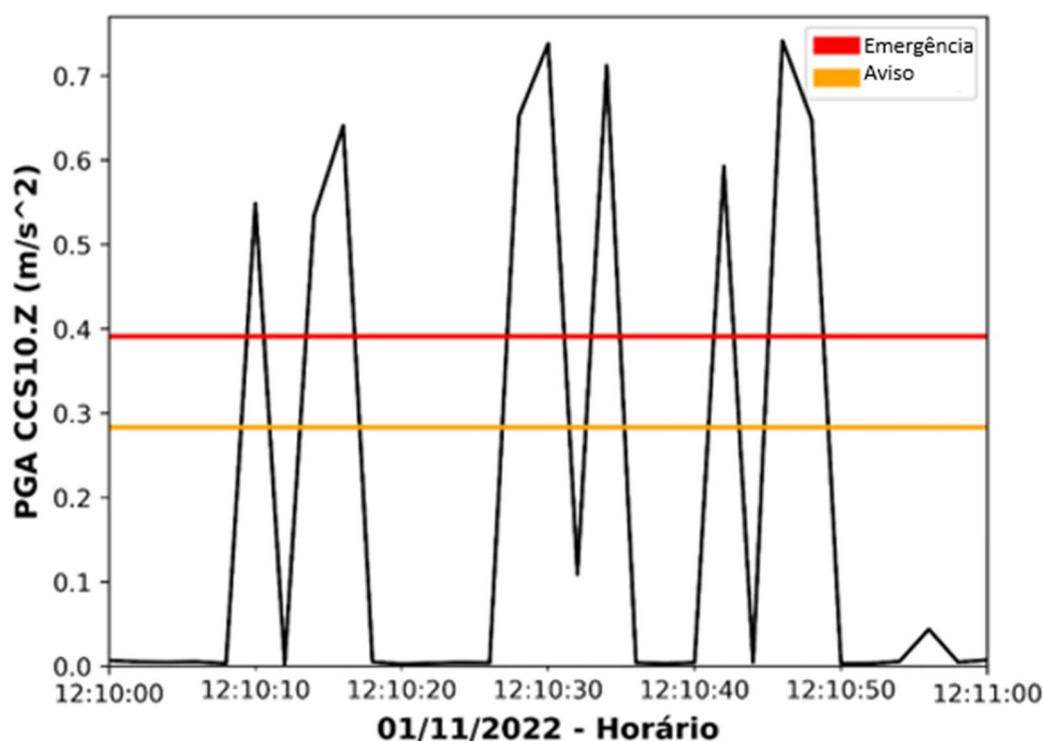


Figura 69: Gráfico do pico de aceleração máxima do solo (PGA) para o teste de martelo do dia 01/11/2021. Fica registrada a atividade entre às 12:00-12:30 (hora local). O teste excedeu os limites de PGA estabelecidos.

Iniciado o monitoramento, relatórios semanais e mensais foram sendo emitidos relatando os eventos relevantes como detonações nas minas próximas à barragem e alertas (tanto de aviso quanto de emergência). Esses alertas foram analisados com o objetivo de identificar a sua causa, o que teria acontecido para exceder o limite de vibração. Para tal é levada em conta a quantidade de sensores que registraram o alerta. A atividade humana, por exemplo (movimentação de máquinas e equipamentos), tipicamente gera uma perturbação local que é percebida por apenas uma estação e pode, posteriormente, ser confirmada. Em contrapartida sismos naturais ou atividades de maior impacto disparam alertas em várias estações, já que a perturbação é regional.

Na maioria dos casos, as detonações feitas não excederam os limites de aceleração estabelecidos e os mais expressivos foram registradas em seis estações. Como as estações estão próximas à localização desses eventos, os tempos de chegada às estações é praticamente igual, fazendo com que os picos de PGV e PGA coincidam (figura 70).

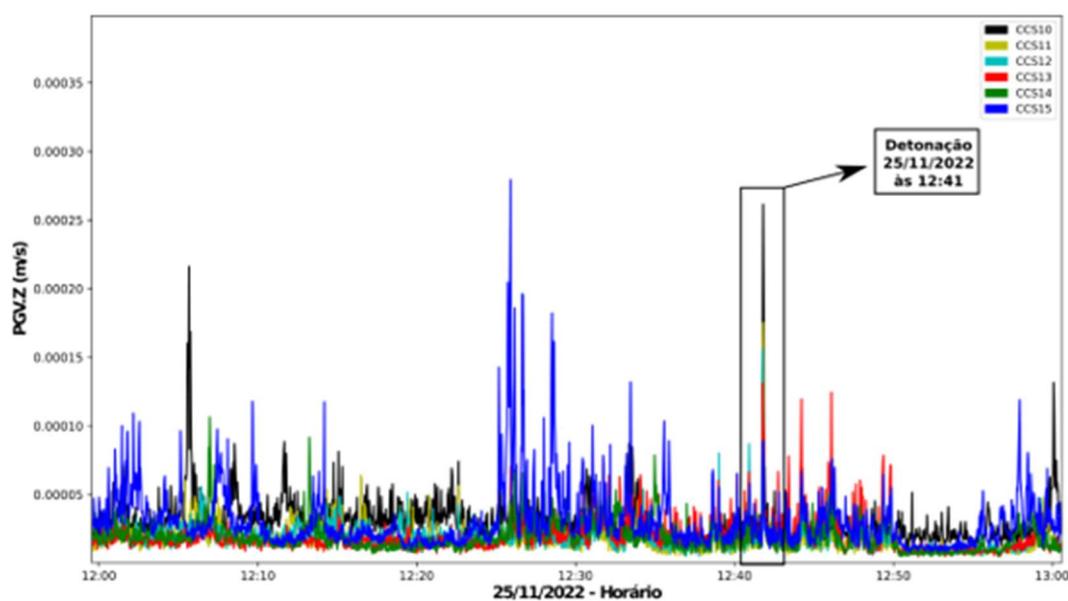


Figura 70: Gráfico da PGV (m/s) do evento de detonação do dia 25/11/2022 no período de 12:00 a 13:00. As estações CCS10, CCS11, CCS12, CCS13, CCS14 e CCS15 marcam bem o evento que ocorreu às 12:41, como demonstrado no gráfico.

Aos domingos, como não há operação de maquinário e/ou humano no entorno das barragens é possível obter uma estimativa do ruído de fundo para cada estação já que as vibrações registradas são predominantemente de fontes não relacionadas à descaracterização das barragens e desmonte de rocha na mina. Na figura 54, estão destacados os níveis de ruído de fundo para as estações CCS02 (maior ruído) e CCS15 (menor ruído). Para a componente vertical (figura 71 a), nota-se que o ruído referente à estação CCS02 é duas ordens de grandeza maior que o da estação CCS15. Já para a componente vertical, essa diferença é de uma ordem de grandeza. Essa diferença de nível de ruído tem relação com a localização das estações e não com possíveis defeitos, considerando que o padrão de vibração entre as estações é semelhante.

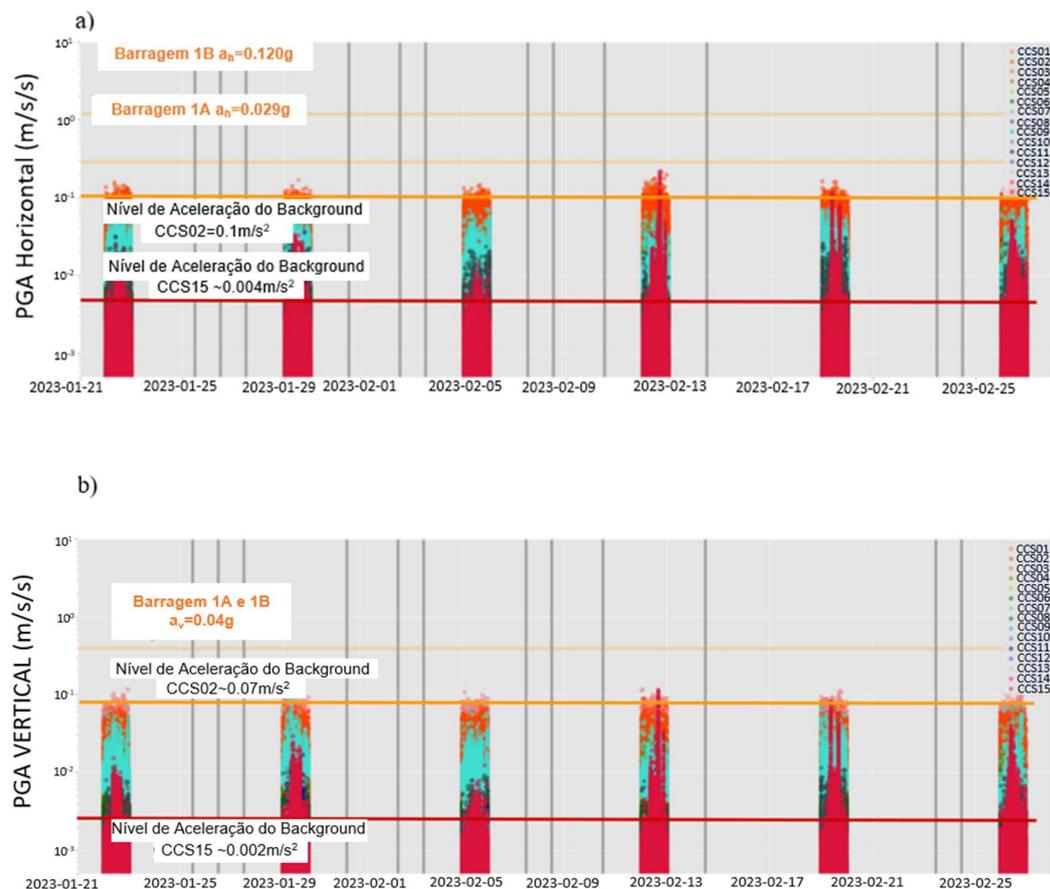


Figura 71: Gráficos PGA em fração de g para os domingos compreendidos entre 21/01/2023 à 28/02/2023. A) Componentes horizontais das estações e b) componente vertical.

Durante o período observado ocorreram alguns sismos, porém nenhum deles teve energia suficiente para disparar alertas na rede local de estações de monitoramento. Esses terremotos são informados pelo Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (SISMOUSP), cuja rede faz parte da Rede Sismógrafa Brasileira (RSBR). Essa rede sísmica regional é capaz de detectar eventos de $M > \sim 3$.

Alguns desses sismos ocorreram nos dias e horários das detonações, o que leva a crer que não constituam um evento natural. Além disso, não foi possível identificar, nos dados de PGA e PGV, as fases P (ondas primárias) e S (ondas secundárias) separadas em tempo. Esse é um forte indício de que as fontes estavam perto da barragem, sem tempo de propagação para que as fases P e S cheguem nas estações com uma diferença de tempo mínima para que possam ser identificadas visualmente. Possivelmente, a deficiência da rede RSBR localizar com precisão

pequenos eventos sísmicos seja o motivo dos epicentros terem sido localizados longe das barragens.

No período de 13 a 19 de março as estações CCS08, CCS09 e CCS10 foram realocadas. Essa mudança se deveu ao andamento das obras de adequação nas barragens. Com isso, essas estações receberam um novo nome, passando a ser respectivamente CCS16, CCS17 e CCS18. A figura 72 evidencia os deslocamentos realizados.



Figura 72: Realocação das estações CCS08, CCS09 e CCS10.

A tabela 5 relaciona os eventos registrados de acordo com relatórios semanais desenvolvidos.

Tabela 5: Relação dos eventos por relatório semanal.

Referência	Alertas emitidos	Sismos	Detonação
Relatório semanal 1	9	0	2
Relatório semanal 2	1	0	3
Relatório semanal 3	13	0	4
Relatório semanal 4	0	0	5
Relatório semanal 5	1	0	0
Relatório semanal 6	2	0	2
Relatório semanal 7	3	0	3
Relatório semanal 8	9	0	2
Relatório semanal 9	2	4	2
Relatório semanal 10	37	8	4
Relatório semanal 11	43	4	3
Relatório semanal 12	74	3	3
Relatório semanal 13	4	5	1
Relatório semanal 14	0	5	1
Relatório semanal 15	0	4	1
Relatório semanal 16	0	6	0
Relatório semanal 17	1	1	2
Relatório semanal 18	91	4	5
Relatório semanal 19	10	3	3
Relatório semanal 20	118	6	5
Relatório semanal 21	46	4	4

5.2.1.1 Análise dos Sismograma

Durante o monitoramento, alertas foram disparados, tendo-se procurado determinar a causa desses gatilhos. Para tanto, foram levadas em consideração a quantidade dos sensores que dispararam o alerta, os dias e horários do ocorrido e, eventualmente, imagens fornecidas por câmeras instaladas nas barragens. Os relatórios desses eventos permaneceram disponíveis na plataforma SiteAlert (figura 73).

Data e Hora	Limite Excedido			
	Nível Estimado (EEW)	Nível Observado (SHW)	Parâmetro	Descrição
2022-11-05 14:40:18	N/A	Aviso	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-05 14:47:31	N/A	Aviso	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-05 14:26:05	N/A	Aviso	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 15:18:02	N/A	Emergência	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 15:16:55	N/A	Emergência	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 14:15:52	N/A	Aviso	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 14:14:55	N/A	Emergência	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 12:31:49	N/A	Emergência	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.
2022-11-03 12:22:08	N/A	Aviso	Aceleração	Sistema de alerta sísmico local não habilitado.

Figura 73: Alertas de gatilho entre os dias 31/10/2022 e 07/11/2022.

Dos 9 alertas (4 críticos e 5 avisos) disparados durante o período de 31 de outubro a 7 de novembro de 2022, os referentes aos dias 3 e 5 de novembro (figuras 74 e 75 respectivamente) foram percebidos apenas pelo sensor CCS06, sendo por isso classificados como oriundos de atividade humana.

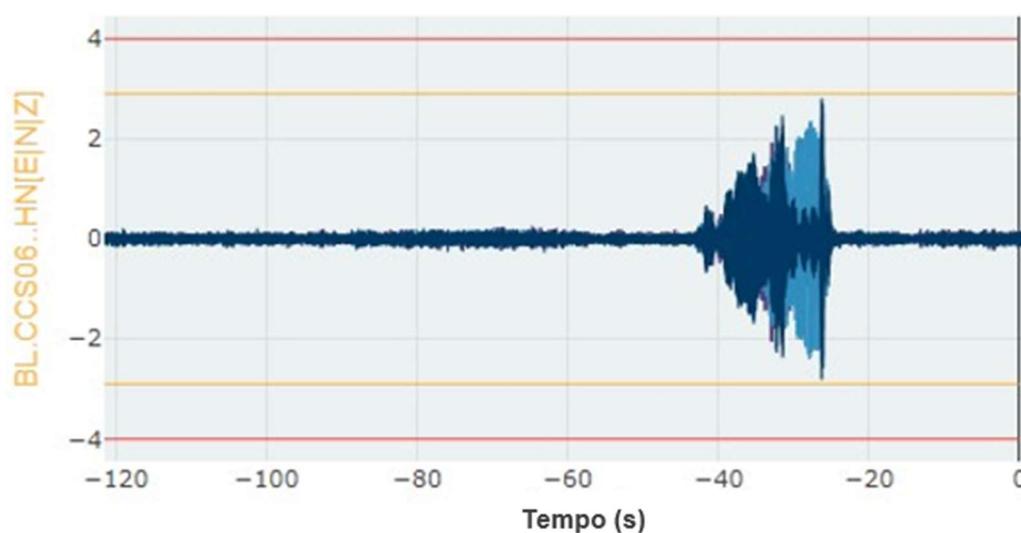


Figura 74: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 3 de novembro.

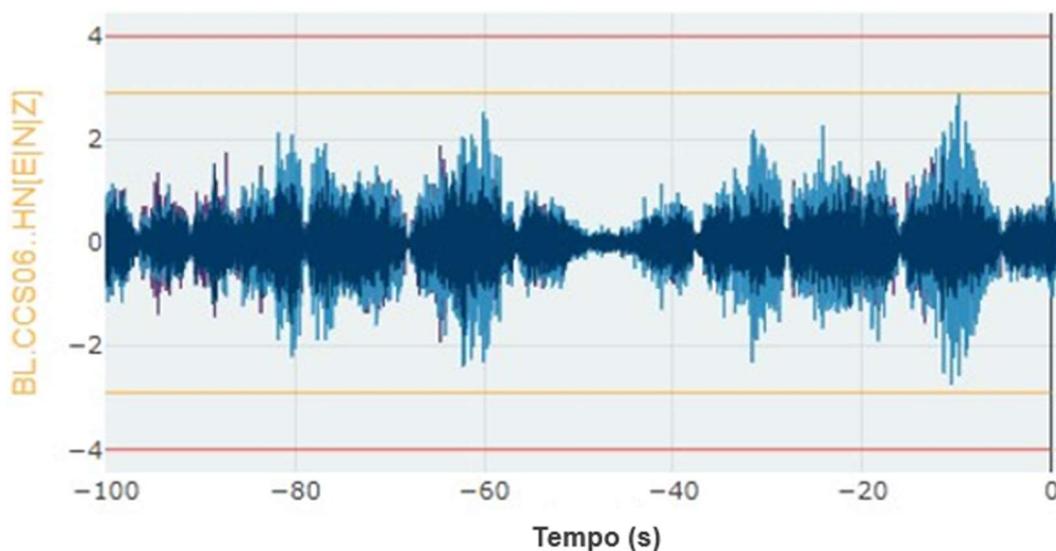


Figura 75: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 5 de novembro.

O único alerta emitido no período de 8 a 14 de novembro foi disparado apenas pela estação CCS08, no dia 12, o que indica que a perturbação foi de origem local, próxima à estação e provavelmente causada por atividade humana. A figura 76 apresenta o sismograma referente a este evento e a figura 77 indica a direção da vibração.

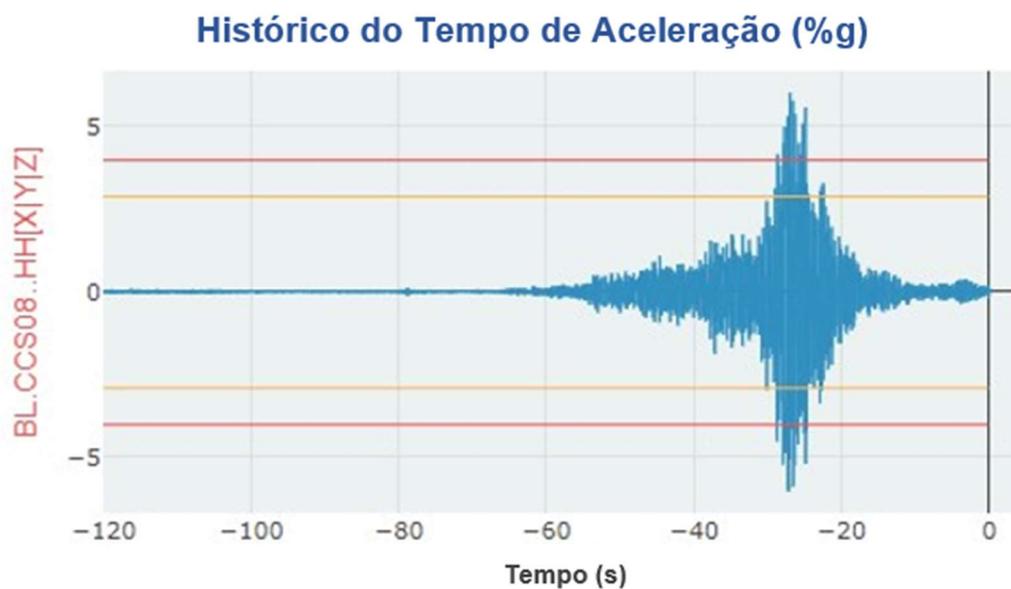


Figura 76: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 12 de novembro.



Figura 77: Localização da estação CCS08 indicando a direção da vibração do evento registrado no dia 12 de novembro.

A figura 78 mostra o sismograma registrado apenas pela estação CCS06, no dia 16 de novembro. Este evento é um dos 13 alertas disparados no período de 16 a 21 de novembro.

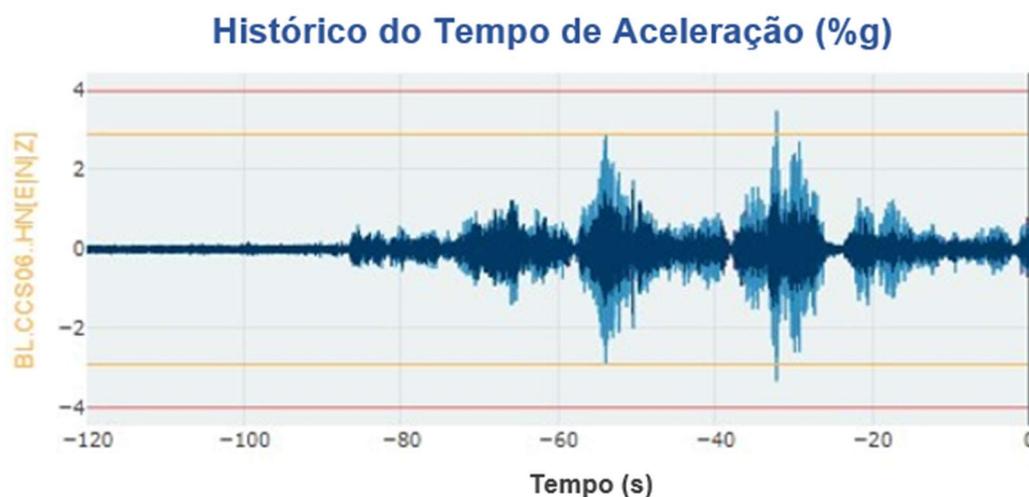


Figura 78: Sismograma referente ao gatilho registrado no dia 16 de novembro.

No dia 29 de novembro um trator empurrando um bloco de concreto passou ao lado da estação 07 e foi registrado pela câmara da estação (figura 79). Este evento, gerou uma notificação por exceder os valores de magnitude estabelecidos.



Figura 79: Registro em câmara do momento da passagem do trator.

Em 27 de dezembro de 2022 um alerta foi registrado pelas estações CCS01, CCS02, CCS03 e CCS04 sendo que, no momento do aviso, não havia atividade próxima às estações. O sismograma gerado por este evento está apresentado na figura 80. Nessa figura, de cima para baixo, cada 3 traços correspondem às componentes x, y e z para cada estação, nessa sequência. É possível ver, na figura, a chegada das ondas nas 3 componentes. Não foi definida a fonte sísmica que proporcionou os registros.

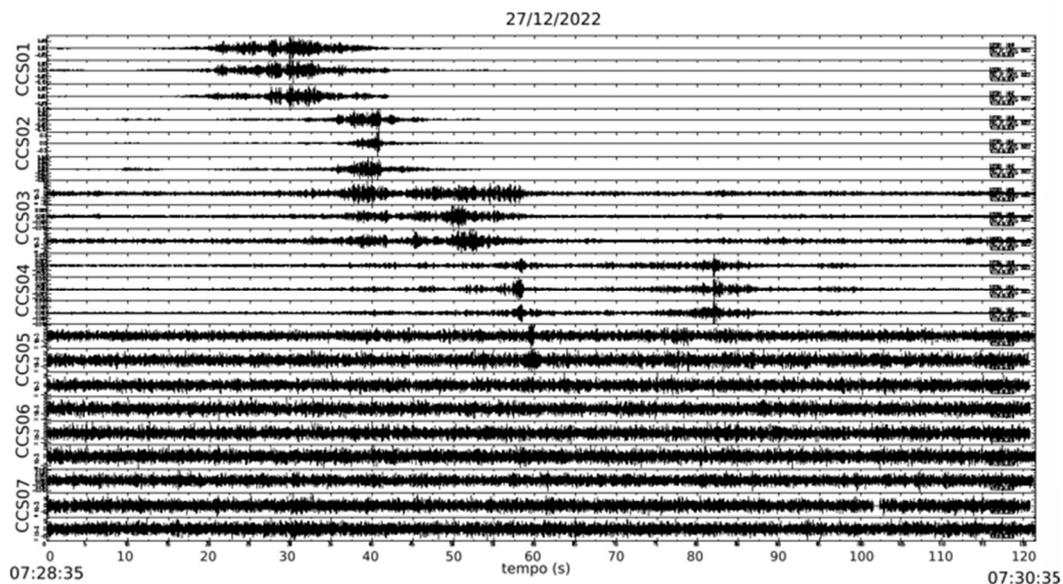


Figura 800: Sismogramas registrados nas estações das barragens 1A/2A, no momento do alerta emitido no dia 27/12.

Durante o período de 2 a 8 de janeiro de 2023, foram emitidos 37 alertas. A maior quantidade desses alertas ocorreu nos dias 4 e 5 de janeiro, sendo registrados pelas estações CCS06 e CCS08 devido à movimentação de maquinário pesado (tratores e escavadeiras de esteira). Como a sua causa é conhecida, foi possível verificar no espectro de frequência a assinatura espectral dessas fontes de vibração. O espectrograma informa como se dá a variação da frequência no decorrer do tempo, o que permite relacionar a movimentação em campo com a respectiva frequência no espectrograma (figura 81 e 82).

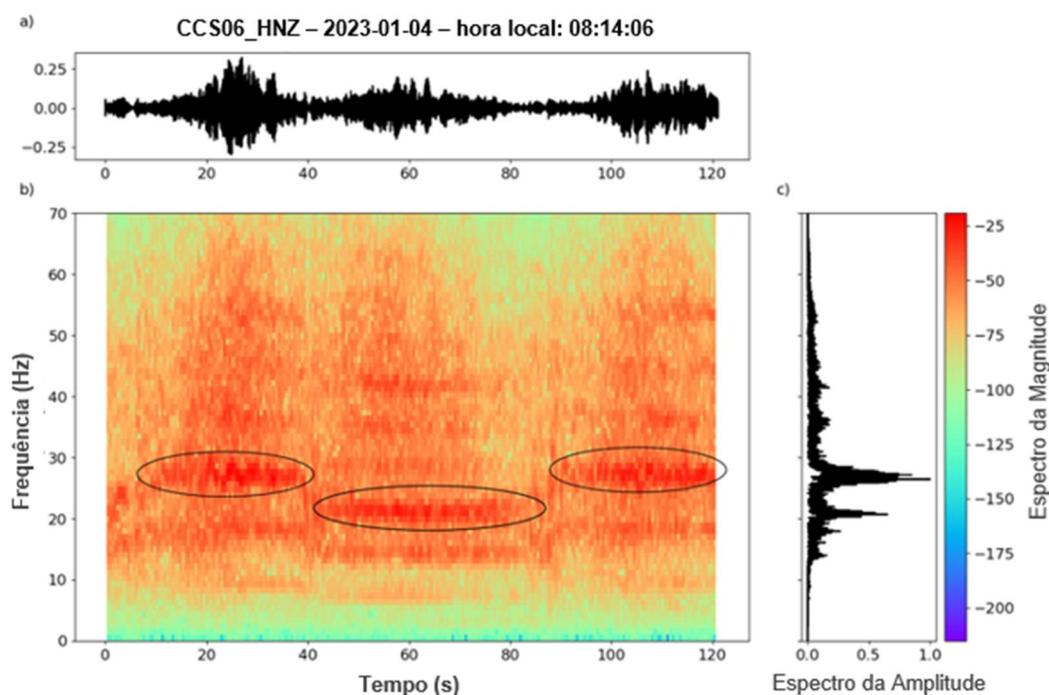


Figura 81:Alerta do 04/01/2023 às 08:14:06 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

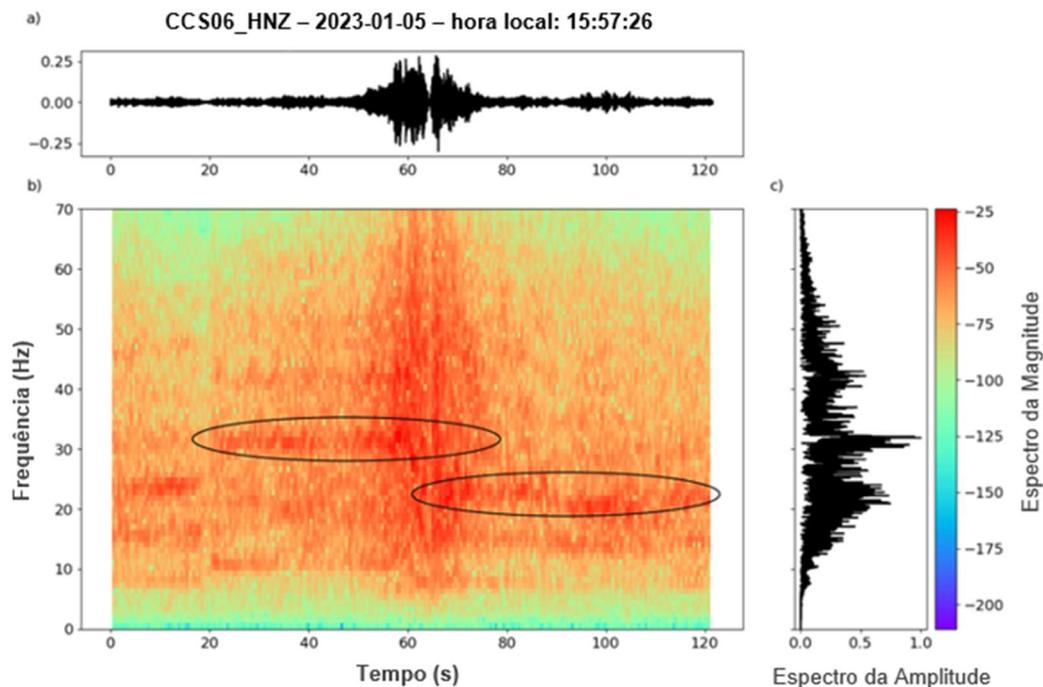


Figura 82: Alerta do 05/01/2023 às 15:57:26 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

Embora seja possível relacionar uma determinada frequência à passagem de um trator de esteira (por exemplo), não significa que sempre que esta frequência aparecer no espectro do dado poderá ser associada à passagem de um trator, pois pode haver outras fontes de vibração com frequências semelhantes. Ainda assim, quando não for possível confirmar a operação desses maquinários como responsáveis por gerar alertas no futuro, ao se verificar o espectro, frequências semelhantes poderão dar uma ideia da causa destes.

Entre 9 e 15 de janeiro de 2023, 43 alertas foram emitidos e a maior parte deles ocorreu no dia 13 de janeiro, nas estações CCS06 e CCS08 e estão relacionados à movimentação de maquinário pesado (tratores e escavadeiras). Como a causa desses alertas é conhecida, mais uma vez foi possível verificar no espectro de frequência a assinatura espectral dessas fontes de vibração (figuras 83 e 84).

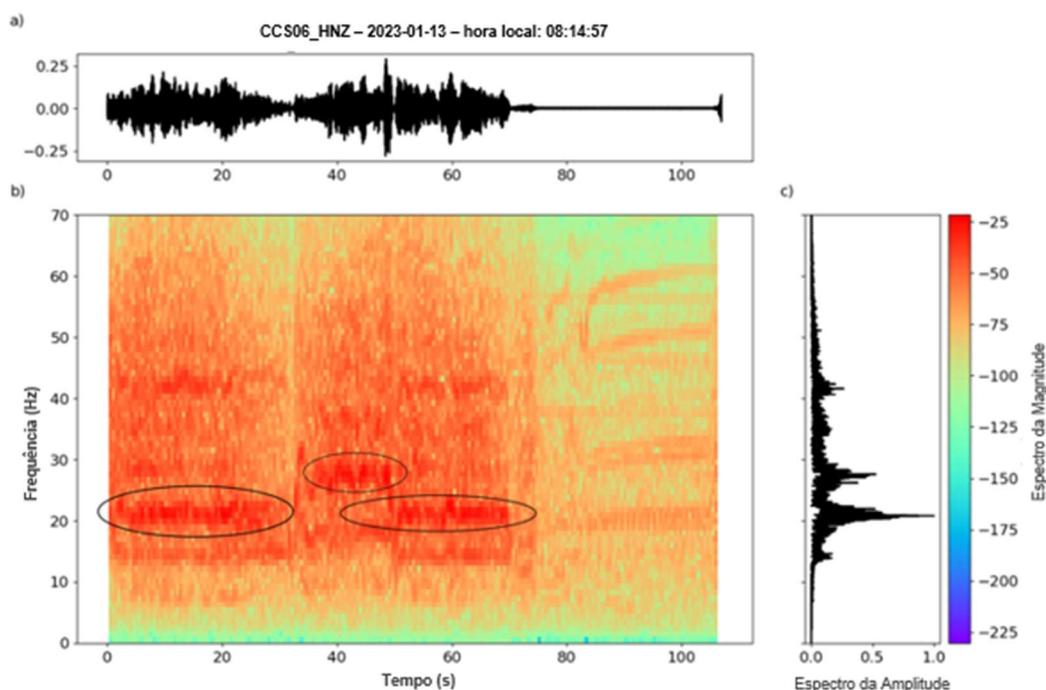


Figura 83: Alerta de 13/01/2023 às 08:14:57 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

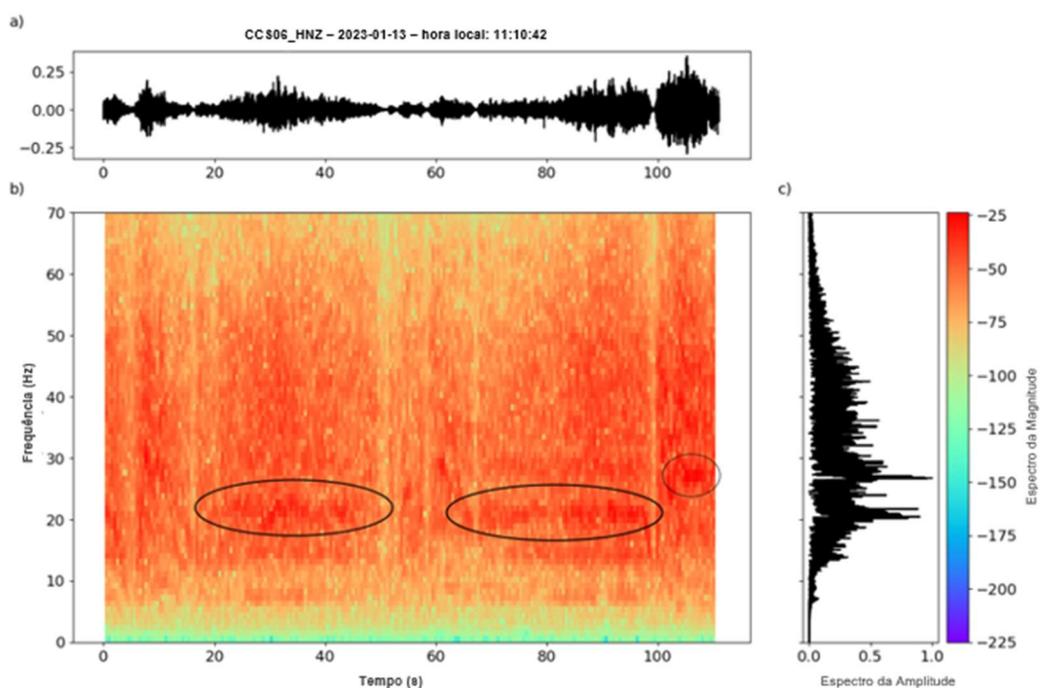


Figura 84: Alerta de 13/01/2023 às 11:10:42 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrados no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

Durante o período de 16 a 22 de janeiro de 2023, 74 alertas foram emitidos. Estes se concentraram nas estações CCS05 e CCS06 e foram disparados devido à movimentação de maquinário pesado. Há correlação visual entre os espectros mostrados nas figuras 85 e 86, já que compartilham a mesma fonte de vibração (operação de maquinário).

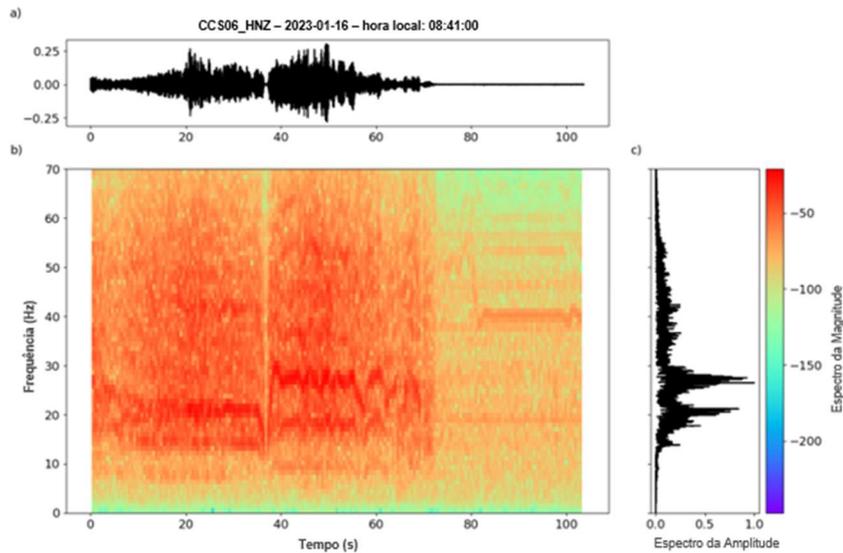


Figura 85: Alerta de 16/01/2023 às 08:41:00 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

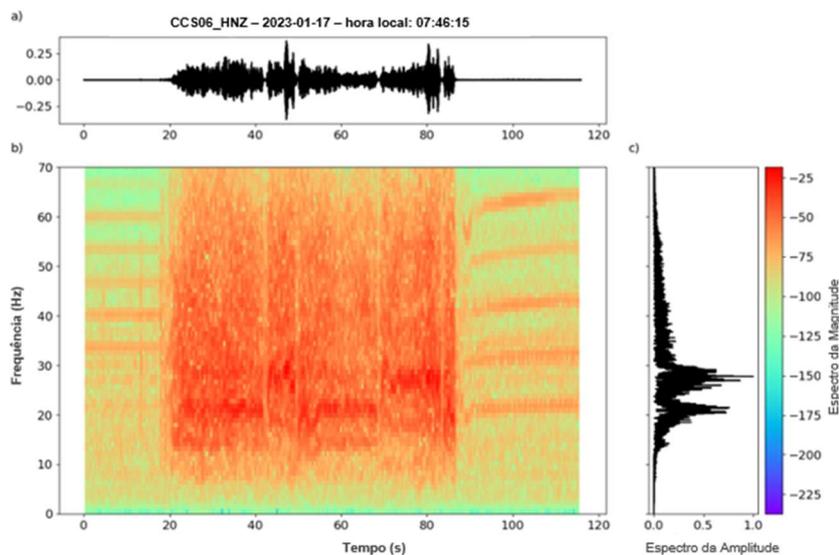


Figura 86: Alerta de 17/01/2023 às 07:46:15 (hora local), estação CCS06_HNZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma.

No dia 17 de janeiro de 2023 foi identificado um padrão diferente nos dados registrados em um alerta emitido pela estação CCS04. Após a análise do sismograma e espectrograma (figura 87) verificou-se indícios de que a esta estação realizou alguns testes de resposta impulsiva o que leva a concluir que este alerta não representa a vibração do meio, mas sim um pulso teórico gravado pela estação 4.

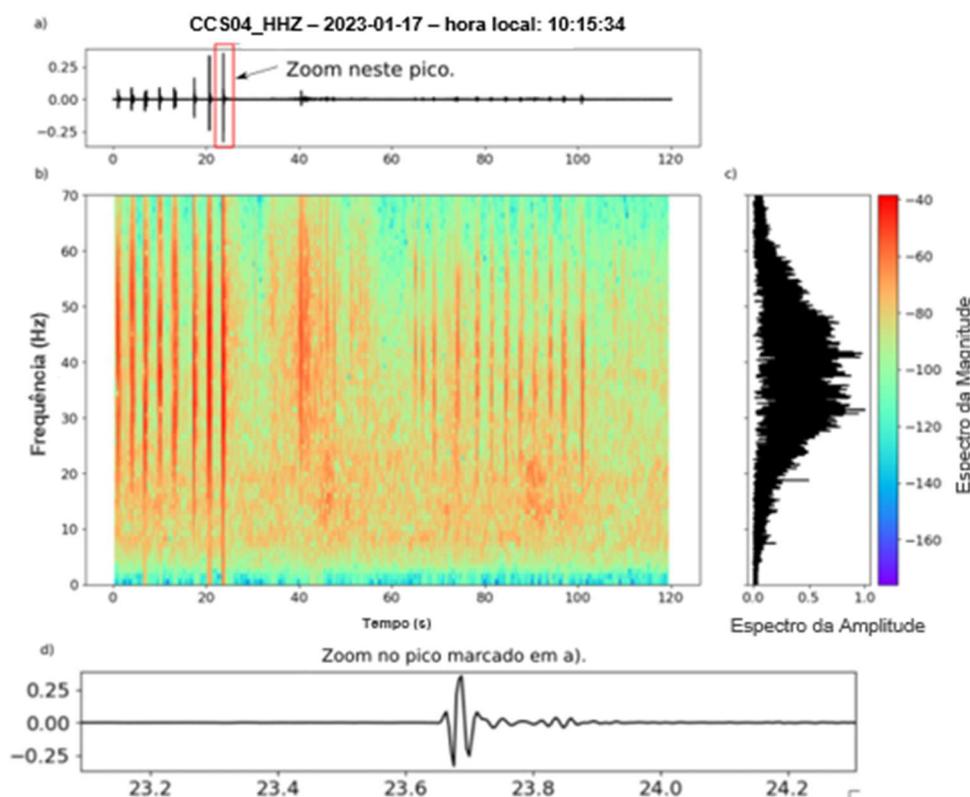


Figura 87: Alerta de 17/01/2023 às 10:15:34 (hora local), estação CCS04_HHZ. A) sismograma registrado no momento do alerta. B) espectrograma calculado com uma janela temporal de 1 s para *Fast Fourier Transform* (FFT). C) Espectro médio do sismograma. D) Ampliação do pico destacado em a).

Tal ocorrência na estação 4 pode indicar problemas de funcionamento e se faz necessária a sua checagem periódica.

Os alertas emitidos entre 23 e 29 de janeiro se concentraram nas estações CCS06 e ocorreram devido à movimentação de maquinário pesado, próximo à estação. Mais uma vez espectrogramas foram gerados e apresentaram a mesma assinatura espectral anteriormente registrada.

Conforme o avanço da obra de descaracterização e descomissionamento das barragens 1A/1B, houve um aumento substancial da quantidade de registro dos alertas emitidos, sempre relacionados à movimentação de maquinário pesado.

5.2.2 Interferometria Sísmica

O monitoramento por interferometria sísmica das barragens 1A/2A e 1B/2B iniciou-se em 15 de dezembro do 2022 tendo como objetivo as variações de velocidade sísmica nas estruturas das barragens. O equipamento utilizado para este método são os mesmos geofones utilizados no monitoramento por microssísmica convencional. Além destes, dois tiltímetros (Tilt90-x, modelo LS-G6), capazes de detectar inclinações em graus, nos 3 eixos (x, y, z) foram instalados em 2 estações (em mourões de concreto com o engastamento de 1,5 m).

Na etapa de empilhamento foram gerados dois tipos de traços: um de referência que representa o *background* da barragem e vários traços correntes que podem amostrar as perturbações que o meio sofre. O traço de referência é construído com um número de correlogramas empilhados superior aos traços correntes. De posse dos traços, pode-se medir a similaridade entre eles. O momento em que o coeficiente de similaridade diminui constitui um o indício de que ocorreram mudanças na estrutura das barragens.

Os gráficos referentes aos percentuais de velocidade em função do tempo foram apresentados em relatórios mensais e semanais emitidos após o início do monitoramento. Como o tempo de monitoramento ainda é pequeno (considerando o momento da elaboração desta dissertação), ainda não é possível verificar variações significativas no percentual de velocidade. Para que se tenha uma amostragem de dados que ofereça tal condição seria necessário ao menos 1 ano de monitoramento, pois haveria a possibilidade de comparar o comportamento dos traços em períodos de chuva e seca por exemplo.

A figura 88 corresponde aos gráficos referentes às barragens 1A/2A e 1B/2B respectivamente. A relação dos pares de estações que interferiram (correlações cruzadas) está apresentada à direita das figuras. Nela, notam-se picos de variação que estão possivelmente associados à introdução de algum sinal diferente do

background de ruído que vinha sendo registrado ao longo do período. Para que esse pico pudesse indicar mudança na condição estrutural de alguma barragem seria necessário que a variação da velocidade fosse contínua e acumulativa, não transitória. Além disso, outros pares de estações que amostram a mesma região teriam registrado tal circunstância. Logo, não há indícios de ganho ou perda de rigidez nas barragens, de acordo com o método de interferometria sísmica. Sabe-se que, nos dias e horários em que esses picos foram registrados, não houve nenhuma operação específica diferente da rotina de circulação de tratores e caminhões nas áreas das minas.

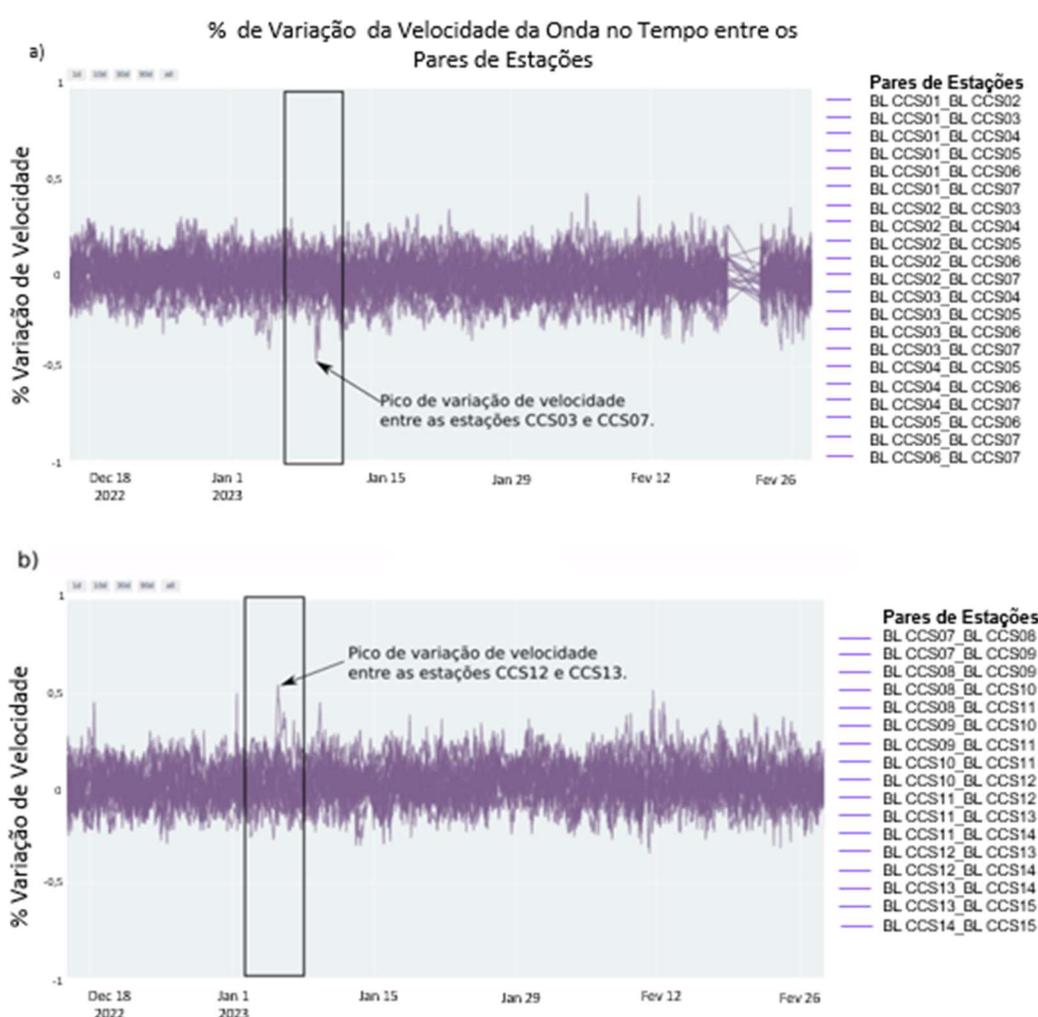


Figura 88: Gráficos mostrando a variação percentual de velocidades em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. b) para barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica.

Ampliando esses mesmos os gráficos, verifica-se que os picos registrados não representam nem 1% de mudança na variação da velocidade conforme indicado na figura 89.

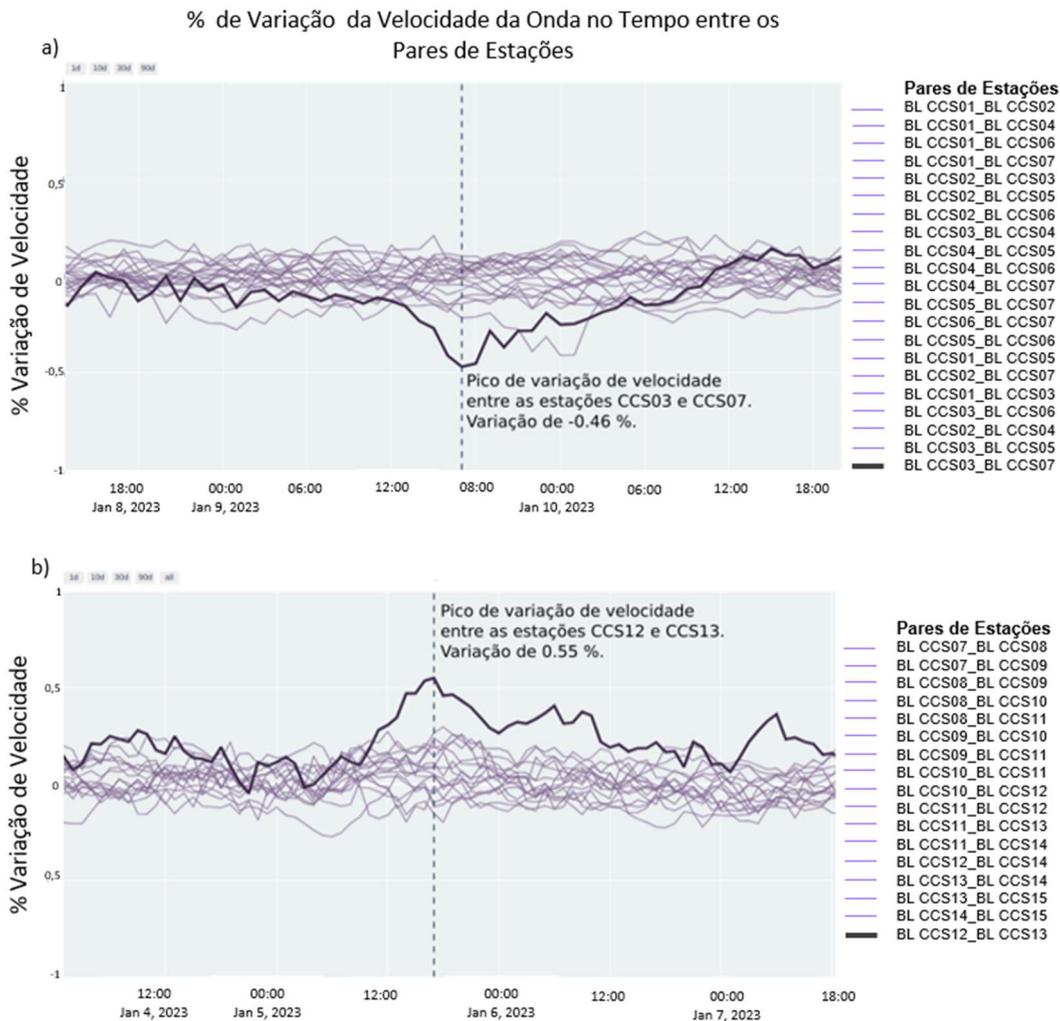


Figura 89. Ampliação dos gráficos mostrando a variação percentual de velocidades em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. b) para barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica.

A realocação de algumas estações (8, 9 e 10) gerou um impacto no processamento dos dados de interferometria para as barragens 1B/2B. Tal realocação criou a necessidade de se calcular um novo traço (sismograma) de referência. Isso porque a variação de velocidade se dá por comparação entre o traço gerado pela correlação entre pares de estações e o traço de referência configurado para cada estação.

Para gerar um novo traço de referência do ruído ambiente é preciso realizar o empilhamento de 4 a 6 semanas de dados. Enquanto o novo traço é gerado, os resultados interferométricos dessas estações não estarão disponíveis.

5.2.2.1 Histórico do Monitoramento

O gráfico referente às variações percentuais de velocidade em função do tempo durante o período de 15 de dezembro de 2022 a 26 de março de 2023 das barragens 1A/2A e 1B/2B segue representado na figura 90. Em nenhuma barragem há variação significativa no percentual de velocidade, os valores permanecem consistentes, sem tendência de mudanças da linha de base durante o período amostrado. Esta condição indica que não ocorreram alterações significativas na estrutura das barragens, sem perda ou ganho de rigidez.

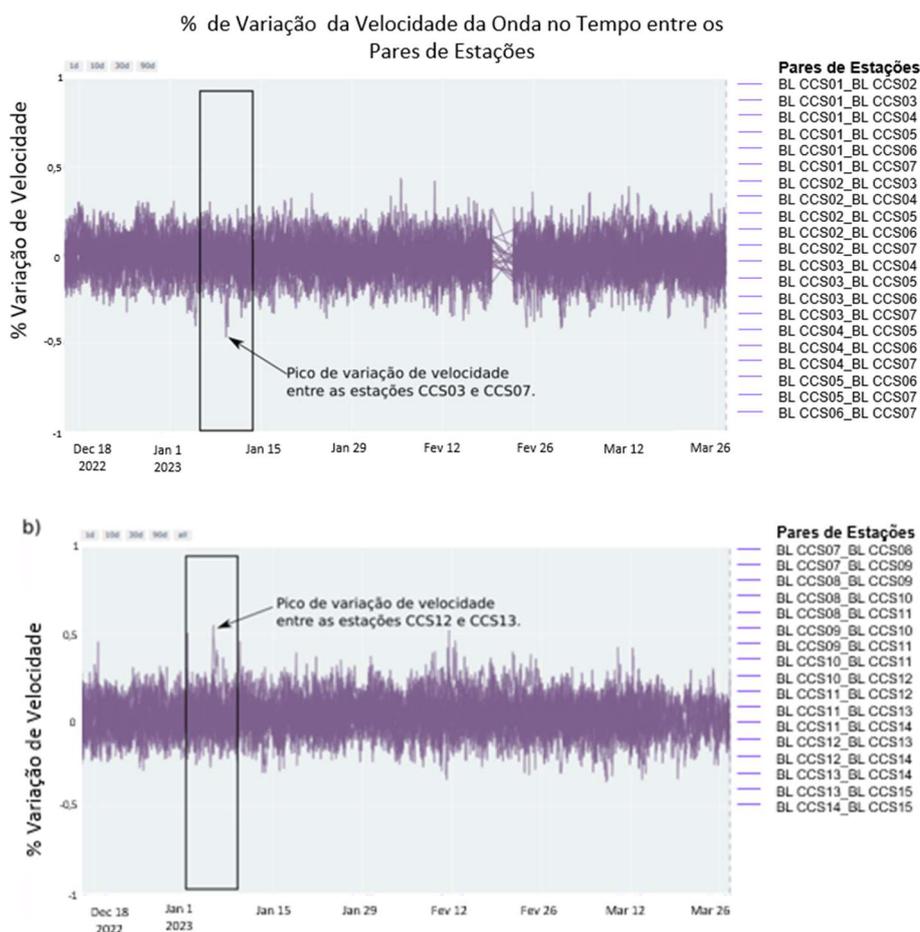


Figura 90: Gráficos mostrando a variação percentual de velocidade em função do tempo. a) para barragem 1A/2A. (b) e barragem 1B/2B. A variação de velocidade foi calculada usando interferometria sísmica.

5.2.3 Discussão

Os gráficos de PGV e PGA em função da distância das detonações, durante o período de maio de 2022 a fevereiro de 2023 seguem apresentados na figura 91. A partir destes é possível observar que não há uma tendência clara do aumento ou diminuição das vibrações com a distância. Sabe-se, entretanto, que estas detonações são oriundas de minas próximas.

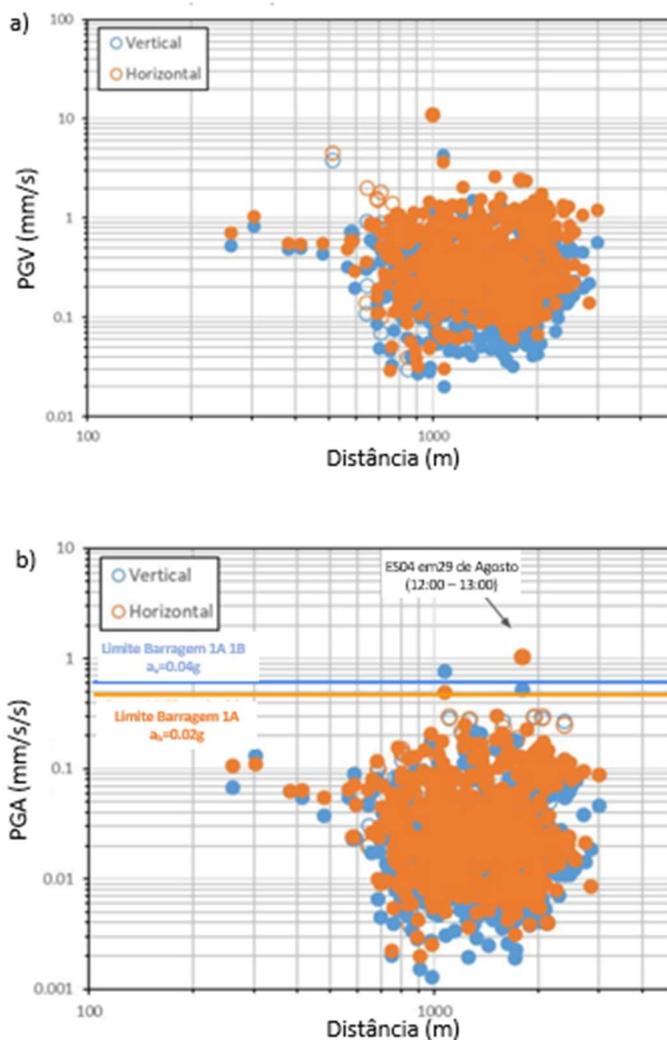


Figura 91: Os círculos vazios se referem aos dados obtidos com a rede de estações anterior e os preenchidos se referem a rede sismográfica atual. a) Gráficos de PGV e b) PGA. Ambos em função da distância das detonações.

A Figura 92 mostra a posição das estações das barragens em monitoramento e as detonações feitas ao longo do tempo.



Figura 92: Imagem de satélite com a posição das detonações realizadas e das estações sísmográficas.

Como pode ser observado, embora as barragens estejam relativamente próximas às minas e as operações de desmonte de rocha constantes

(aproximadamente 3 detonações por semana), esta atividade não tem feito vibrar de modo preocupante a estrutura das barragens.

A grande maioria dos alertas foi disparado por apenas uma estação devido a atividades humanas envolvendo, em particular, movimentação de maquinário pesado. Isso significa que, mesmo que esta operação tenha constantemente ultrapassando os limites estabelecidos de aceleração, ocorreram na superfície e de forma pontual (não se propagam para outras estações).

Com continuidade do monitoramento do microsísmica convencional, eventualmente poderá ser registrado algum evento que traga atenção por exceder os limites estabelecidos e seja percebido por um número maior de estações. Este evento pode estar relacionado a sismos de maior magnitude ou detonação, caso ocorra um aumento na quantidade de explosivos (por exemplo). Por isso a importância do monitoramento, já que é fundamental que seja conhecida a recorrência desses eventos.

6 Conclusões

Este estudo revela que os métodos geofísicos aqui apresentados se mostraram eficientes como técnicas complementares ao monitoramento de barragens. Como o monitoramento convencional, que utiliza de instrumentação e inspeções visuais é limitado, já que oferece apenas informações pontuais do meio, o emprego da geofísica torna-se recomendável.

Através da campanha geolétrica foi possível identificar pontos, localizados no maciço, que carecem de atenção. Esses pontos foram definidos a partir dos baixos valores de resistividade em regiões em que se esperava encontrar camadas mais resistivas, ou seja, as seções de eletrorresistividade apontaram presença de água onde não se esperava encontrar.

Os modelos em 3D das seções combinados às leituras dos piezômetros e INA's, indicaram a possibilidade da ocorrência de fluxo de água, migrando do reservatório para o talude da barragem e processos de percolação. Além disso, este estudo revelou que as camadas investigadas apresentaram valores de resistividade em geral menores que os encontrados na literatura.

O método geofísico da eletrorresistividade permitiu conhecer as reais condições de saturação da barragem 1B o que leva a melhores condições de controle e viabiliza tomadas de decisões mais bem embasadas no que tange à minimização dos riscos, seja investigando a causa desses pontos de atenção e/ou intervindo em obras para estabilização (caso entendam como necessário) garantindo assim a segurança da barragem.

O monitoramento microssísmico convencional utilizado mostrou que as detonações realizadas, em sua grande maioria, não geraram vibrações capazes de disparar alertas, por serem menores que os limites de aceleração definidos. Os sismos registrados pela rede sismográfica regional também não tiveram energia suficiente para disparar alertas. O principal responsável pelo disparo dos alertas durante o monitoramento foi a atividade humana com movimentação de maquinário pesado.

A causa de alertas como atividade humana com movimentação de máquinas nem sempre pode ser inicialmente confirmada, sendo que, como estes alertas foram disparados por apenas uma estação, a causa foi determinada como decorrente de atividade humana. Com o avanço do monitoramento, espectrogramas dessa fonte de vibração foram gerados possibilitando identificar a sua assinatura espectral. Dessa forma, a identificação de outras fontes com frequências semelhantes tornou-se possível.

O monitoramento por interferometria sísmica foi implantado, no entanto devido ao curto tempo de monitoramento (os dados analisados compreendem ao período de dezembro de 2022 a março de 2023) não houve como observar mudanças significativas no percentual de variação da velocidade de onda. Os picos registrados nos gráficos apresentados não representam nem 1% de mudança, o que possivelmente indica a introdução de algum sinal diferente do *background* de ruído.

6.1 Sugestões para Estudos Complementares

Considerando a possibilidade de haver fluxo de água no reservatório em direção ao talude da barragem 1B e somado à suspeita de percolação de água talude, é recomendável conhecer a permeabilidade do maciço, através de ensaios de permeabilidade, para que associado as condições de contorno da barragem possa ser desenvolvido um modelo de fluxo.

Tendo em vista que a metodologia de interferometria sísmica utilizada para o monitoramento de barragens é uma técnica nova, ainda pouco explorada, estudos complementares para uma melhor aplicabilidade desta técnica se fazem necessários.

Já foi dito anteriormente que a interferometria sísmica se utiliza do percentual de variação da velocidade como objeto de estudo, no entanto uma questão a ser considerada é a de quais são as velocidades nas ondas sísmicas antes do monitoramento.

Se sabe que os materiais que compõe o barramento apresentam granulometria e umidades diferentes dependendo da região, logo espera-se que a velocidade das

ondas também varie de acordo com a região. Sendo assim, um estudo sísmico raso, através dos métodos MASW ou MAN, forneceria essa informação.

Uma vez conhecendo as velocidades iniciais de acordo com a região, a análise tende a ser mais refinada. Isso porque onde as velocidades de onda forem menores, mesmo pequenas variações no percentual de velocidade terão um peso maior se comparadas a regiões com velocidade de onda maiores.

Referência

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, Brasil. Resolução nº 4, 15 de fevereiro de 2019. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método a montante ou por método declarado como desconhecido. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de fevereiro de 2019. Disponível em: [RESOLUÇÃO Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019 - Imprensa Nacional \(in.gov.br\)](#). Acesso em: 30/08/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, Brasil. Report Trimestral Descaracterização de Barragens a Montante. Apresenta um breve panorama da situação atual das barragens alteadas pelo método de montante existentes no Brasil, cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração – SIGBM e do andamento de seus respectivos processos de descaracterização. Setembro de 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/report_trimestral_set_2023/view. Acesso em: 25/10/2023

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, Brasil. Sistema de Gestão de Barragem de Mineração. Cadastro Nacional. Disponível em: [ANM – Agência Nacional de Mineração](#). Acesso em 25/10/23.

AGUIAR, G. Z. 2021. **Monitoramento de Barragens utilizando sísmica passiva: um estudo a partir de modelos sintéticos**. 2021. 69 f. Monografia. Universidade de Brasília, DF, Brasil, 2021.

ALBURQUERQUE, R.; BRAGA, M. A.; OLIVEIRA, L. A.; DIAS, L. S. O.; ALMEIDA, L. A. P.; OLIVEIRA, A. H. & BRANDÃO, S. 2019. **Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa: aplicação na barragem B1 de Cajati, São Paulo**. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ. Vol 42, p. 567-579.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de**

Piezocone. 2004. 215 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** 2006. 136 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

ASSIS, A e ESPÓSITO, T. **Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica.** In: Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, 3. REGEO 95. Anais ABMS/ABGE/CBGB, Ouro Preto. Vol 2, p. 593-601. 1995.

ASSUMPÇÃO, M. e DIAS NETO, C. M. **Sismicidade e estrutura interna da Terra.** In: Teixeira W., Toledo M. C. M., Fairchild T. R., Taioli F. (eds.) Decifrando a Terra. Oficina de Textos, São Paulo. Cap. 3, p. 43-62. 2000.

AZAM, S. & LI, Q. **Tailings dam failures: A review of the last one hundred years.** Waste Geotechnics, p. 50–54. 2010.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita.** 2006. 256 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BERTULUCI, F. B. **Análise das condições de percolação em barragem de terra a partir do método geofísico da eletrorresistividade.** 2020. 70 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2020.

BOADU, F. K. and OWUSU-NIMO, F. **Influence of petrophysical and geotechnical engineering properties on the electrical response of unconsolidated Earth materials.** Geophysics, vol 75, p. 21-29. 2010.

BOADU, F. K., and SEABROOK, B. **Effect of clay and salinity on the spectral electrical response of soils.** Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol 11, p. 161–170. 2006.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.** 2006. 126 f. Tese de livre-docência, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2006.

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geométricos em Hidrogeologia,** Oficinas de Textos, São Paulo. p. 7-61. 2016.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens e suas alterações. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: [L12334 \(planalto.gov.br\)](http://planalto.gov.br/L12334). Acesso em: 30/08/23.

BROD, J. A.; RIBEIRO, C. C.; GASPAR, J. C.; JUNQUEIRA-BROD, T. C.; BARBOSA, E. S. R.; RIFFEL, B. F., ... & FERRARI, A. J. D. **Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá, Minas Gerais. Vol. 42, p. 1-29. 2004.

CARDOZO, F. A.; RUIVER, C. A.; GEHLING, W. Y. **Considerações a Riscos Geotécnicos em Barragem de Rejeito.** Departamento de Engenharia Civil, UFRGS/DECIV, Porto Alegre. p. 1-14. 2020.

CETESB. Métodos geofísicos/CETESB, GTZ. 1.ed. São Paulo: CETESB, 1999.

CETEM. 2010. Introdução ao tratamento de Minérios. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. 5ª Edição, p. 3-20.

CHAMMAS, R. **Barragens de Contenção de Rejeitos.** Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 1989. 29 p.

CHAMMAS, R., O. ABRAHAM, Ph CÔTE, HELLE A. PEDERSEN, and SEMBLAT, J. F. **Characterization of heterogeneous soils using surface**

waves: homogenization and numerical modeling. International Journal of Geomechanics 3, no. 1. 2003.

COLLETTE, C.; CARMONA-FERNANDEZ, P.; JANSSENS, S.; ARTOOS, K.; GUINCHARD, M. & HAUVILLER, C. **Review of sensors for low frequency seismic vibration measurement.** 2011.

CONSENZA, P. E.; MARMET, F.; REJIBA, Y. J; CUI, A; TABBAGH, and CHARLERY, Y. **Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France:** Journal of Applied Geophysics, 60, p.165–178. 2006.

DA ROCHA, D. C. G.; BRAGA, M. A. S. & RODRIGUES, C. T. **Geophysical methods for BR Tailings Dam research and monitoring in the mineral complex of Tapira, Minas Gerais, Brasil.** Revista Brasileira de Geofísica, 37, p. 275-289. 2019.

DENTITH, M. & MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist.** Cambridge University Press, Cambridge. 2014.

DIAS, L.S.O.; OLIVER G.; ARAÚJO, R.N.; BARBOSA M.R.; BRANDI, I.; FERREIRA, M.L.; BRAGA, M.A.S.; GOMES, R.C. **A microseismic monitoring pilot project of natural caves in Carajás – PA.** In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica. Ouro Preto, Short Papers. p.73-80. 2016.

DOUGLAS, J. **On the recovery of peak ground velocite and peak ground displacemete from Strong-motion records.** 12^o European Conference on Earthquake Engineering. 2002.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeétrico na investigação rasa. Tese de Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia.** 2007. 215 f. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GANDOLFO, O. C. B & GALLAS, J. D. F. **O Arranjo Pólo-Dipolo como alternativa ao Dipolo-Dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade.** Revista Brasileira de Geofísica, 25, p. 227-235. 2007.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITHELL, J. G. **The Late Cretaceous impact of the Trindade Mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil.** *Journal of Petrology* n. 36, p. 189-229. 1995.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; WESKA, R. K.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H. **Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume beneath western Brazil.** *Contrib. Mineral. Petrol.*, n. 126, p. 303-314. 1997.

GOMES, C. B.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; AZZONE, R. G.; RUBERTI, E.; ROJAS, G. E. E. **Cretaceous Carbonatites of the Southeastern Brazilian Plataform: a Review.** *Brazilian Journal of Geology*, 48 (2): p. 317-345. 2018.

GOMES, J. R. A. **Monitoramento de mudanças de velocidade no Arquipélago São Pedro e São Paulo com interferometria de ruído sísmico.** 2020. 65 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, 2020.

GRECKA, V.; HEIGL, W. M. **Microseismic monitoring.** Tulsa/OK - USA: Society of Exploration Geophysics. p. 1-293. 2017.

GROTZINGER, J; JORDAN, T.H. **Para Entender a Terra.** Bookman, Porto Alegre. Cap17. 2013.

HAVSKOV, J.; BORMANN, P. e SCHWEITZER, J. **Seismic source location.** In: **Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2),** Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ. p. 1-36. 2012.

KANAMORI, H. **Locating earthquakes with amplitude: Application to real-time seismology.** *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, p. 264–268. 1993.

KOEFOED, O. **Geosounding Principles Vol.1: Resistivity Sounding Measurements**. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam. 1979.

KUSKY, T. **Earthquakes: plate tectonics and earthquake hazard**. New York/NY - USA: Facts On File. p. 67-110. 2008.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R. & GIACHETI, H. L. **Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP**. Brazilian Journal of Geophysics. Vol. 24, no. 3, p. 357-374. 2006.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 128 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, USP, São Paulo, 2006.

MA, J.; ZHAO, G.; DONG, L.; CHEN, G. & ZHANG, C. **A Comparison of Mine Seismic Discriminators Based on Features of Source Parameters to Waveform Characteristics**. Research Article Hindawi Publishing Corporation. p. 1-10. 2015.

MACHADO, W. G. de F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. 155f. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo. 2007.

MADRUCCI, V.; TAIOLI, F.; ARAÚJO, C. C. **Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia-SP**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 4, p. 437-451. 2005.

MAINSANT, G.; LAROSE, E.; BRONNINMANN, C.; JONGMANS, D.; MICHOU, C. & JABOYEDOFF, M. **Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction**. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 117. p. 1-12. 2012.

MALAGUTTI FILHO, W.; MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C.; COURA, M. M. & NETTO, L. G. **Emprego Integrado de métodos sísmicos e geoeletricos no estudo de barragens de terra de pequeno porte**. VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica. p. 1-6. 2018.

MALOVICHKO, D. **Discrimination of blasts in mine seismology**. Deep Mining. p. 161-172. 2012.

MENDECKI, A. J. **Mine Seismology: Glossary of Selected Terms**. The 8th Rockburst and Seismicity in Mines Symposium, Russia. p. 1-29. 2013.

MENDECKI, A. J. **Mine Seismology Reference Book – Seismic Hazard**. Institute of Mine Seismology, Australia. 2016.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE GOIÁS, 2019. Portal do Ministério Público do Estado de Goiás: <http://www.mpggo.mp.br/portal/noticia/promotor-cobra-na-justica-que-Mineradora-de-niobio-em-ouvidor-esvazie-barragens-de-rejeitos>. Acesso em: 30/08/23.

MOONEY, M. A., PAREKH, M. L., LOWRY, B., RITTGERS, J., GRASMICK, J., KOELEWIJN, A. R., REVIL, A. & ZHOU, W. **Design and implementation of geophysical monitoring and remote sensing during a full-scale embankment internal erosion test**. In: Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability. 2014.

NAKATA, N.; GUALTIERI, L. & FICHTNER, A. **Seismic Ambient Noise**. Cambridge University Press. 2019.

OLIVER, G.; BRENGUIER, F.; CAMPILLO, M.; ROUX, P.; SHAPIRO, N. M. & LYNCH, R. **Investigation of coseismic and postseismic processes using in situ measurements of seismic velocity variations in an underground mine**. Geophysical Research Letters 42: p. 9261–9269. 2015.

OLIVEIRA, L. A. 2021. **Caracterização e Monitoramento de Barragens de Rejeito através de Métodos Geofísicos. Eletroresistividade e**

Microssísmica da Barragem B1 de Cajati, São Paulo. 2021. 109 f. Dissertação de Mestrado em Geofísica Aplicada, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

OLIVEIRA, L. A.; BRAGA, M. A.; PROSDOCIMI, G.; CUNHA, A. S.; SANTANA, L. E GAMA, F. **Improving tailings dam risk management by 3D characterization resistivity tomography technique: Case study in São Paulo – Brasil.** Journal of Applied Geophysics. p.1-15. 2023.

PALMIERI, M. **Modelo Geológico e Avaliação de Recursos Minerais do Depósito de Nióbio Morro do Padre, Complexo Alcalino-Carbonatítico Catalão II, GO.** 2011. 94 f. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

PAULA, A. Q. **Retroanálise do Registro de um Sistema de um Monitoramento Microssísmico de uma Ruptura de Talude de Mina.** 2020. 220f. Dissertação de Mestrado em Geofísica Aplicada – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

PERINI, L. **Caracterização da Variabilidade de Rejeitos de Mineração de Ouro Preto e sua Influência na Análise do Efeito da velocidade no Ensaio CPTu.** 2021. 157 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2021.

PLANÈS, T.; MOONEY, M. A.; RITTGERS, J. B. R., PAREKH, M. L.; BEHM, M., & SNIEDER, R. **Time-lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise.** Géotechnique 66(4): p. 301–312. 2016.

RAFAEL, H. M.; ROMANEL, C. **Potencial de Liquefação Estática no Alçamento de uma Barragem de Rejeito.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Goiânia. p. 1-10. 2014.

RIBEIRO, C.C.; BROD J.A.; PETRINOVIC, I.A.; GASPAR, J.C.; JUNQUEIRA-BROD, T.C. **Pipes de brecha e atividade magmática**

explosiva no complexo alcalino-carbonatítico de Catalão I, Goiás. Ver. Bras. Geoc. 31: p. 417-426. 2001.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO.** 2008. 473 f. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

RIBEIRO, C.C.; BROD, J.A.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; GASPAR, J.C.; PALMIERI, M.; CORDEIRO, P.F.O.; TORRES, M.G.; GRASSO, C.B.; BARBOSA, E.S.R.; BARBOSA, P.A.R.; FERRARI, A.J.D. & GOMIDE, C.S. **Potencial e controles metalogenéticos de ETR, Ti e Nb em províncias alcalinocarbonatíticas brasileiras.** 2014.

RINEHART, R. V., PAREKH, M. L., RITTGERS, J. B., MOONEY, M. A., & REVIL, A. **Preliminary implementation of geophysical techniques to monitor embankment dam filter cracking at the laboratory scale.** In: Proceedings of the 6th Annual International Conference on Software Engineering (ICSE). 2012.

RITTGERS, J. B., REVIL, A., PLANÈS, T., MOONEY, M. A., & KOELEEIJN, A. R. **4-D imaging of seepage in earthen embankments with time-lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization.** Geophysical Journal International, v. 200, n. 2, p. 758-772. 2014.

RODRIGUES, C. T.; PAULA, A. Q.; DIAS, L. S. O.; BRAGA, M. A. **Interferometria sísmica passiva para monitoramento de barragens.** Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica 112: p.10-13. 2020.

ROSA FILHO, J. C. **Modelagem sísmica de ondas elásticas e migração reversa no tempo em meios transversalmente isotrópicos.** 2002. 152 f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SHEARER, P. M. **Introduction to seismology**. Cambridge University Press. p.229-338. 2009.

SILVA-CASTRO, J. J. **Blast vibration modeling using improved signature hole technique for bench blast**. 2012. PhD—Lexington, Kentucky: University of Kentucky, 2012.

SILVA, G. P. **Caracterização Mineralógica do Minério Carbonatítico de Elementos Terras Raras de Catalão I**. 2019. 65 p. Trabalho Final de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2019.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. [S. l.]: Oficina de textos. 2006.

SNIEDER, R. **The theory of coda wave interferometry**. Pure Appl. Geophys. 163, p. 455-473. 2006.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics** (second edition). Cambridge University Press, Cambridge. 1990.

THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J. C. **Migrating Cretaceous-Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: melts from the deflected Trindade mantle plume?** J. Petrol, n. 39, p. 1493-1526. 1998.

XIAO, R.; NAKATA, N.; LUMLEY, D. **Introduction to microseismic source mechanisms**. The Leading Edge, Microseismic source mechanisms. v. 34, n.8, p. 876–880. 2015.

XIAO, Y; FENG, X; HUDSON, J. A.; CHEN, B.; FENG, G.; LIU, J. **Suggested method for in situ microseismic monitoring of the fracturing process in rock masses**. Rock mechanics and rock engineering, v. 49, p. 843–869. 2016.